



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Sander Soomets

**KEILA JÕE HÜDROENERGEETILISE POTENTIAALI
MODELLEERIMINE KASUTADES HYPE MUDELIT**

**MODELLING OF THE HYDROENERGETICAL POTENTIAL
OF RIVER KEILA USING THE HYPE MODEL**

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Vesiehituse ja veekaitse õppekava

Juhendaja: nooremteadur Ottar Tamm; MsC

Tartu 2017

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Sander Soomets		Õppekava: Vesiehitus ja veekaitse	
Pealkiri: Keila jõe hüdroenergeetilise potentsiaali modelleerimine kasutades HYPE mudelit			
Lehekülgi: 61	Jooniseid: 28	Tabeleid: 4	Lisasid: -
Osakond:		Veemajandus	
Uurimisvaldkond (valdkonna kood):		Keskkonnatehnoloogia (T270); Hüdrogeoloogia (P470)	
Juhendaja:		nooremteadur Ottar Tamm	
Kaitsmiskoht ja –aasta:		Tartu, 2017	
<p>Eesti riik tähtsustab üha enam kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamist ja taastuvenergia osakaalu tõstmist energiatootmises. Hüdroenergia on üheks taastuvaks energiaallikaks, mille täit potentsiaali pole Eestis hetkel erinevatel põhjustel kasutusele võetud.</p> <p>Töö eesmärgiks on hinnata hüdroloogilise mudeli HYPE kasutatavust Eestis, Keila jõe näitel ja mudeli sobivusel tuleviku vooluhulkade modelleerimine. Põhiliseks eesmärgiks on modelleeritud vooluhulkade kaudu Keila jõe hüdroenergeetilise potentsiaali muutuse arvutamine tulevikuks, Keila-Joa hüdroelektrijaamas perioodil 2041-2100 ja tuleviku vooluhulkade muutuse mõju hindamine eelnimetatud hüdroelektrijaama tootlikkusele perioodil 2041-2100.</p> <p>Kasutatavad programmid olid HYPE ja ArcSWAT. Töös kasutatav kliimastsenaarium oli RCP4.5, mis on mõõdukas soovitatav põhistsenaarium ja eeldab et kasvuhoonegaaside emissiooni tipp jääb 21. sajandi sisse ja kiirguslikud mõju sajandi lõpuks on 4,5 W/m². Kliimaprojektsioonid Eesti jaoks on jagatud kaheks perioodiks: 2041-2070 ja 2071-2100.</p> <p>Mudel kalibreeriti perioodile 1968-1997 ja valideeriti perioodile 1998-2010. Kalibreerimise tulemusena saadud parameetrite väärtustega saadi rahuldava</p>			

efektiivsusega mudel. Kasutades kliimastsenaariumit modelleeriti vooluhulgad perioodile 2041-2100 ning nende järgi arvutati Keila jõe hüdroenergeetiline potentsiaal.

Võrreldes perioodiga 1966-2010 hüdroenergeetiline potentsiaal Keila-Joa hüdroelektrijaamas vähenes 0,04 GWh perioodil 2041-2070 ja kasvas 0,20 GWh perioodil 2071-2100. Seega võiks kaaluda teise turbiini lisamist Keila-Joa hüdroelektrijaama. Lisanduv keskmine tootlikkus 66 kW võimsusega turbiini lisamisel Keila-Joa hüdroelektrijaama on 174 MWh aastas. Lisades turbiini võimsusega 133 kW on keskmine lisanduv tootlikkus 345 MWh aastas.

Märksõnad: HYPE, Keila jõgi, hüdroenergia, kliimamuutus, hüdroloogiline modelleerimine

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Sander Soomets		Speciality: Hydraulic Engineering and Water Pollution Control	
Title: Modelling of the hydroenergetical potential of river Keila using the HYPE model			
Pages: 61	Figures: 28	Tables: 4	Appendixes: -
Department:		Water Management	
Field of research:		Enviromental technology (T270); Hydrogeology (P470)	
Supervisor:		Junior researcher Ottar Tamm	
Place and date:		Tartu, 2017	
<p>Estonia is interested in reducing the emission of greenhouse gases and increasing the percentage of energy production from renewable sources. One of the renewable energy sources which full potential isn't being used in Estonia at the moment due to various reasons is hydropower.</p> <p>The aim of this thesis is to evaluate the applicability of hydrological model HYPE for Keila river flow modelling and if the model is applicable, then the future Keila river flows are modelled. Main goal is to calculate Keila river hydroenergetical potential in Keila-Joa hydropower plant for the time period of 2041-2100 and to evaluate how changes in Keila river flows affect the productivity of aforementioned hydropower plant.</p> <p>Following programs were used: HYPE and ArcSWAT. Climate scenario used in thesis was RCP4.5, which is a moderate recommended main scenario and it expects that the peak of greenhouse gas emissions will stay in 21st century and radiative forcing will be 4,5 W/m² by the end of 21st century. Climate projections for Estonia are composed for two time periods: 2041-2070 and 2071-2100.</p> <p>Model was calibrated for time period 1968-1997 and validated against period 1998-2010. Model efficiency was acceptable with calibrated parameter values. Using given climate</p>			

scenario the flows were modelled for time period 2041-2100 and were used to calculate Keila river hydroenergetical potential.

Compared to the time period of 1966-2010 hydroenergetical potential in Keila-Joa hydropower plant decreased by 0,04 GWh on the time period of 2041-2070. On the time period of 2071-2100 the hydroenergetical potential increased by 0,20 GWh compared to the time period of 1966-2010. Due to the increase in hydroenergetical potential adding another turbine in Keila-Joa hydropower plant should be considered. By adding a turbine with 66 kW capacity the average additional hydropower plant productivity is 174 MWh per year. By adding a turbine with 133 kW capacity the average additional hydropower plant productivity is 345 MWh per year.

Keywords: HYPE, Keila river, hydroenergy, climate change, hydrological modelling

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1. KEILA JÕGI	10
2. EKSPERIMENDI METOODIKA	15
2.1. HYPE ja ArcSWAT protseduurid	15
2.2. Kliima sisend	16
2.2.1. Temperatuur	18
2.2.2. Sademed	19
2.2.3. Päikese kiirgus	20
2.2.4. Suhteline õhuniiskus	22
2.2.5. Tuule kiirus	23
2.3. Mulla, maakasutuse ja topograafia sisendid	23
2.3.1. Topograafia	23
2.3.2. Mullad	25
2.3.3. Maakasutus	26
2.3.4. Mulla- ja maakasutustüüpide kombinatsiooni klassid	27
2.4. Kliimamudel perioodile 2041-2100	27
2.5. Kalibreerimine	30
2.6. Elektrienergia arvutamine	34
3. TULEMUSED	36
3.1. Kalibreering perioodile 1968-1997	38
3.2. Valideering perioodile 1998-2010	40
3.3. Vooluhulkade modelleerimine perioodiks 2041-2100	41
3.4. Hüdroenergeetiline potentsiaal	44
3.4.1. Aastate keskmise tootlikkuse muutus tulevikus	44
3.4.2. Vee erikasutusloas sätestatud piirangute mõju tootlikkusele	46
3.4.3. Modelleeritud vooluhulkadega tekkiva vea hindamine	46
3.4.4. Kliimamuutuse mõju hüdroelektrijaama tootlikkusele	47
3.4.5. Turbiini potentsiaalse võimsuse muutus	49
4. ARUTELU	51
KOKKUVÕTE	53
KASUTATUD KIRJANDUS	56
SUMMARY	59

SISSEJUHATUS

Eestis toodetakse ligikaudu 85 % elektrienergiast kasutades kütusena põlevkivi. Kuid tänu karmistuvatele keskkonnanõuetele ning kallinevale põlevkivi kaevandamisele soovitakse aina enam võtta kasutusele taastuvaid energiaallikaid. Üheks taastuvaks energia allikaks, mille täit potentsiaali pole erinevatel põhjustel Eestis kasutusele võetud on hüdroenergia.

Hüdroenergia on üks mehaanilise energia liik, kus energia vabaneb vee langemisel Maa raskusjõu mõjul. Hüdroenergiat saab muundada näiteks vesiveskites mehaaniliseks energiaks või hüdroelektrijaamades elektrienergiaks. (Liiber 2012)

Hüdroenergiast toodetud elektrienergia moodustab 71 % maailmas taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergiast. Aastal 2016 oli hüdroelektrijaamade installeeritud koguvõimsus 1,064 GW, andes 16 % kogu maailma elektrienergia toodangust. Globaalne kasutamata hüdroenergeetiline potentsiaal on 10 000 TWh aastas ja kliimamuutuste tõttu ennustatakse selle kasvu. (World Energy Council 2016)

Seisuga märts 2011 oli Eesti elektrivõrkudesse ühendatud 47 erinevat hüdroelektrijaama ja elektrit tootvat vesiveskit, millede võimsus jäi 4 kW ja 2 MW vahele. Hüdroelektrijaamade koguvõimsuseks aastal 2015 oli Eestis 7,2 MW ja aastane toodang 26,6 GWh, mis on vähem kui 1 % kogu elektritoodangust (Eesti Taastuvenergia Koda 2016). Eesti hüdroenergeetiline potentsiaal ilma Narva jõeta on 30-60 MW, selle võimsuse juures oleks võimalik toota elektrienergiat 150-400 GWh aastas ehk ära katta 2-5 % tarbimisest (Raesaar 2005). Tagasihoidlik hüdroenergeetiline potentsiaal tuleneb sellest, et Eestis on jõed lühikesed, veevaesed ja väikese keskmise kaldega.

Hüdroenergiast elektri tootmise eeliseks on see, et see on keskkonnasõbralik kuna elektri tootmisel ei paisata õhku kasvuhoonegaase. Eeliseks on ka see, et kuigi hüdroelektrijaamade ehitamine on mahukate mulla- ja betoonitööde tõttu kulukas, on energia omahind siiski suhteliselt madal, sest käituskulud on väikesed (Raesaar 2005). Eestis rajatakse hüdroelektrijaamad enamasti vanadele paisudele, taastatakse endised jaamad või

rekonstrueeritakse vesiveskid hüdroelektrijaamadeks, seega pole enamjaolt vaja teha kulukaid betooni- ja mullatöid.

Hüdroenergeetiline potentsiaal on otseselt sõltuv hüdroelektrijaama turbiine läbivast vooluhulgast. Hindamaks hüdroenergeetilise potentsiaali muutust tulevikus on võimalik kasutada hüdroloogilisi mudeleid. Hüdroloogilisi mudeleid on kolme erinevat põhitüüpi: füüsiliste protsesside simuleerimisel põhinevad (MIKESHE, SWAT), empiirilised (ANN) ja kontseptuaalsed mudelid (HYPE, HBV, TOPMODEL, VIC) (Devi *et al.* 2015).

Tuleviku vooluhulkade modelleerimiseks on välja valitud programm HYPE (Hydrological Predictions for the Environment). HYPE mudel töötati välja 2000. aastate alguses Rootsis SMHI töötajate poolt (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). Tegu on kontseptuaalse valgala põhise hüdroloogilise mudeliga (SMHI Hype Code). HYPE on alates aastast 2011 vabavaraline programm, millel puudub graafiline kasutajaliides ning programm töötab tekstifailidega. HYPE mudel osutus valituks kuna on tõestatud tema suutlikkus vooluhulkasid tõhusalt modelleerida (Pechlivanidis *et al* 2015).

Tuleviku vooluhulkade prognoosimisel on tähtis arvesse võtta kliimamuutuse mõju jõe hüdroloogilisele režiimile. Seda mõju saab hinnata kliimamudelite ja kliimamudelite jaoks koostatud kliimastsenaariumide abil. Kliimamudelid on atmosfääri, ookeanide, maapinna ja jää vastasmõjusid simuleerivad arvutiprogrammid, mida kasutatakse ilmadünaamika uurimiseks ja ilma ennustamiseks ning tuleviku kliima kohta prognooside tegemiseks (Velbri 2014: 31).

Kliimamuutuse andmed saadi Keskkonnaagentuuri poolt koostatud lepingulise töö „Eesti riikliku kliimamuutuste mõjuga kohanemise strateegia ja rakenduskava ettepaneku väljatöötamine“ lisast: „Eesti tuleviku kliimastsenaariumid aastani 2100“. Keskkonnaagentuur kasutas oma töö koostamisel kolme erinevat EURO-CORDEX projekti mudelit: Taani Meteoroloogia Instituudi mudelit DMI-HIRHAM5, Rootsi Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi mudelit RCA4 ja Hollandi Kuningliku Meteoroloogia Instituudi mudelit KNMIRACMO22 ja kahte kliimastsenaariumit: RCP 8.5 (pessimistlik lisastsenaarium) ja RCP4.5 (mõõdukas põhistsenaarium). Lõputöös valiti kliimastsenaariumiks RCP4.5, kuna see on soovitatav põhistsenaarium. RCP4.5 eeldab et

kõik maailma riigid võtavad ette kasvuhoonegaaside emissioonide piiramise nende maksustamise näol.

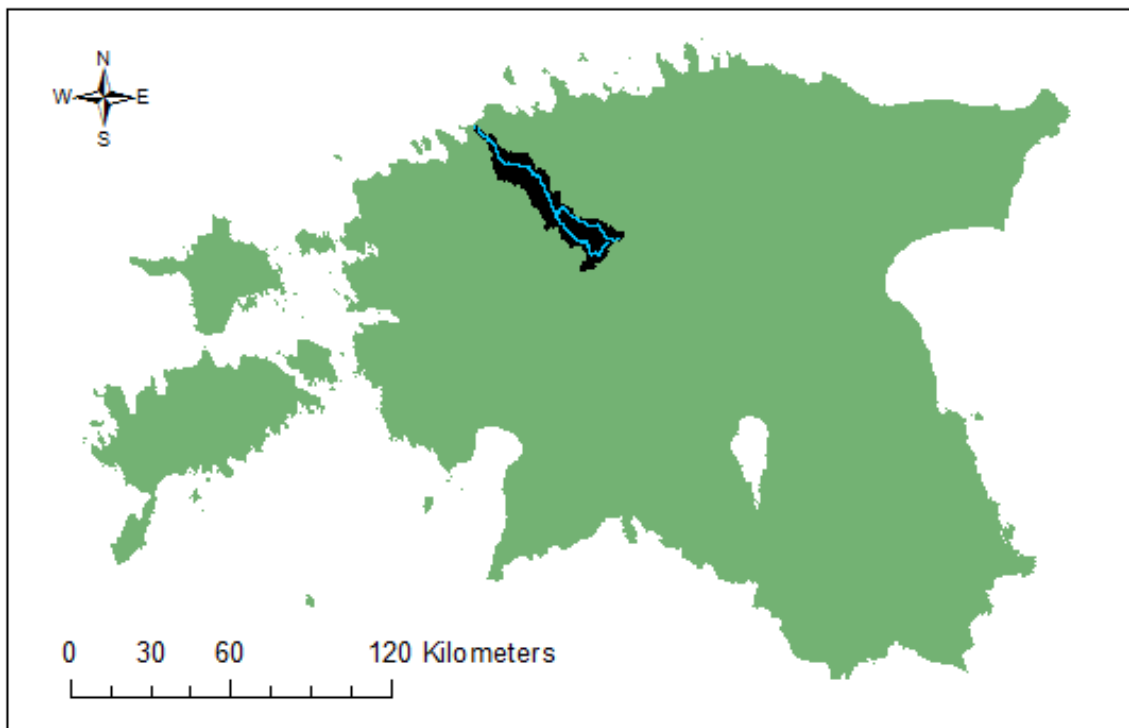
Vooluhulkade modelleerimiseks osutus valituks Keila jõgi, kuna Keila jõel paikneb juba töötav Keila-Joa hüdroelektrijaam.

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on hinnata hüdroloogilise mudeli HYPE kasutatavust Eestis Keila jõe näitel. Põhiliseks eesmärgiks on Keila jõe vooluhulkade modelleerimine ja modelleeritud vooluhulkade kaudu Keila jõe hüdroenergeetilise potentsiaali arvutamine perioodile 2041-2100. Eesmärgiks on ka analüüsida, kuidas tuleviku vooluhulkade muutus mõjutab Keila-Joa hüdroelektrijaama sesoonset tootlikkust.

Autori tänusõnad kuuluvad lõputöö juhendajale nooremteadur Ottar Tammele Eesti Maaülikoolist, kelle käest saadi Keila jõe valgala maakatte- ja kõrguskaart.

1. KEILA JÕGI

Keila jõgi on Soome lahe vesikonna pikim jõgi pikkusega 127,3 km, jõe valgala ametlik pindala on 669,3 km² (Keskkonnaagentuur 2010). Jõe alguseks loetakse kohta Kuimetsa külast 5 km lõunakagu pool. Keila jõgi voolab Põhja-Eesti lavamaa territooriumil, kui välja arvata Kõrvemaa piiridesse jääv lühike algusosa. Jõgi läbib võrdlemisi tiheda asustusega piirkondi ja jõe kallastel paikneb rohkesti asulaid. Tähtsamateks lisajõgedeks on Atla ja Maidla jõgi. Keila jõgi suubub Soome lahte. (Järvekülg 2001: 501)



Joonis 1.1. Keila jõgikonna asukoht Eesti kaardil

Absoluutne jõe veepinna kõrgus on lähtel 75,1 m ning suudmes 0 m, kus ta voolab Läänemerre, Soome lahte. Jõe keskmine lang on 0,65 m/km, mis on hüdroenergia tootmiseks ebasoodne. Jõe lang on suurim alamjooksu viimasel 5 kilomeetril: 4,46 m/km, kus jõgi voolab läbi Põhja-Eesti paekalda. Keila-Joa pargis suudmest 1,7 km kaugusel on jõel 6,1 m kõrgune Keila juga astangulaiusega 60-70 m.

Jõesängi laius keskjooksul on keskmiselt 20 m, alamjooksul on jõesängi laius keskmiselt 25 m. Jõe sügavus keskjooksul on keskmiselt 1,8 m, alamjooksul 2,0 m. Alamjooksul on jõeoru laius 950 m ja sügavus 7,5 m. (Järvekülg 2001: 501)

Aasta keskmine vooluhulk Keila jõe alamjooksul on 5,5-6,5 m³/s, maksimaalne vooluhulk 120-150 m³/s ja minimaalne vooluhulk 0,2-0,5 m³/s (Loopman 1979). Tavaliselt on Keila jõe vooluhulgad kõige suuremad kevadise lumesulamise ajal. Jõe aasta üldvooluhulgast moodustab lumesulamisvesi 33%, vihmavesi 32% ja põhjavesi 35% (Ресурсы..., 1966).

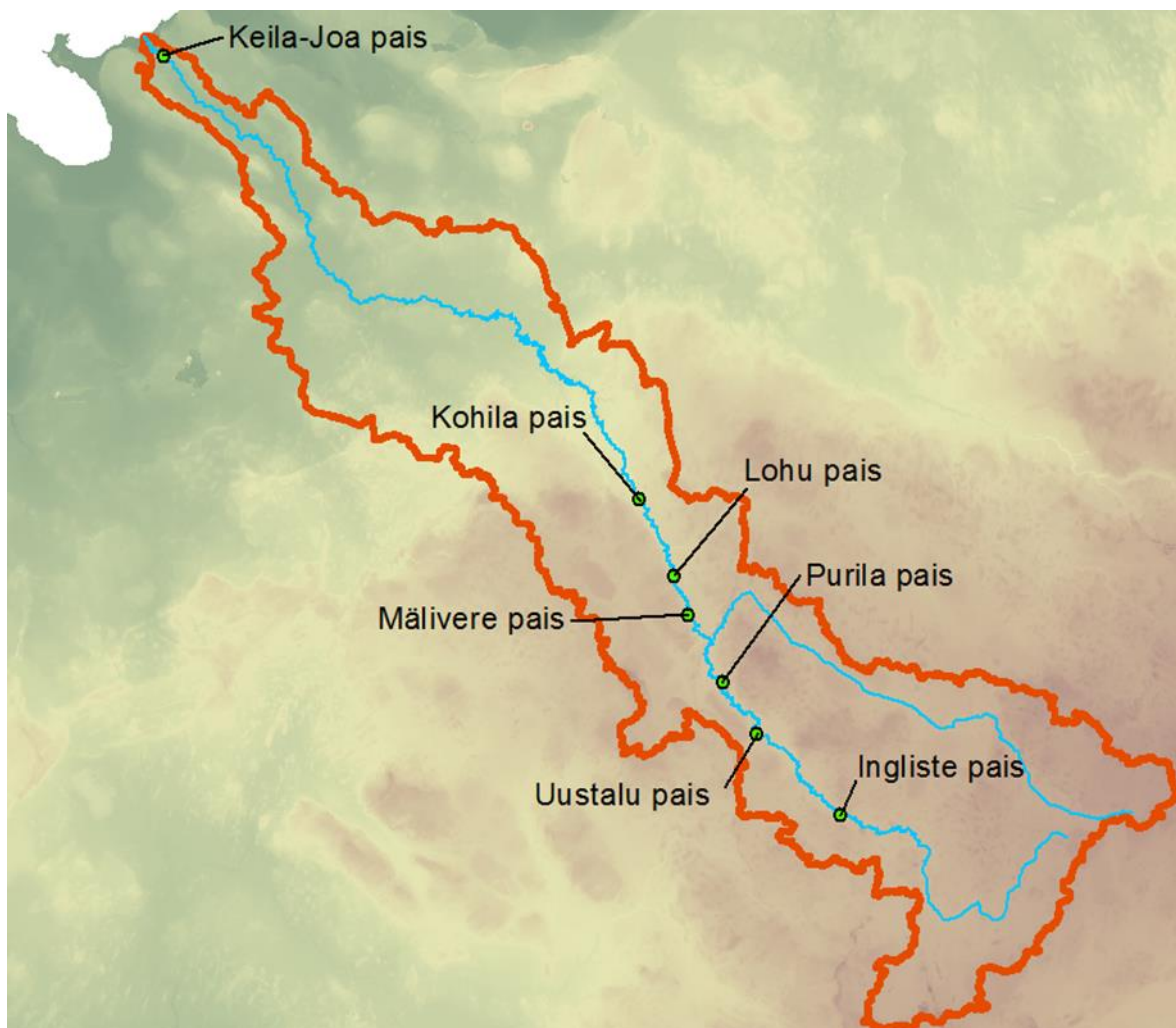
Keila jõe vooluhulkasid mõõdetakse Keila hüdromeetriaajas, asukohaga Harjumaa, Keila linn. Keila jõe hüdromeetriaam avati aastal 1923 ja automatiseeriti aastal 2007. Jaam asub suudmest 19 kilomeetri kaugusel. Jaama graafiku nulli kõrguseks on 23,8 m merepinnast. Peale vooluhulkade mõõdetakse antud jaamas ka veetaset, veetemperatuuri jõe põhjas ja pinnaveekihis, jäänähteid ja jääpaksust, õhutemperatuuri ning sademeid (Keila hüdromeetriaam 2017).

Lõputöös kasutatakse vaatlusperioodi 1966 kuni 2010, millest piisab hüdroloogilise tsüklilisuse mudeldamiseks. Vooluhulkade mõõtmisandmeid kasutatakse modelleeritud vooluhulkade kalibreerimiseks ja valideerimiseks Keila jõel.

Keila jõel asub kokku seitse paisu (Joonis 1.2): Kohila, Purila, Lohu, Mälivere, Uustalu, Ingliste ja Keila-Joa pais. Kohila paisu kõrguseks on 2,50 m, paisutamise tulemusena tekkinud veekogu nimeks on Kohila järv, mida kasutatakse virgestuseks. Tekkinud paisjärv on ka miljööväärne. Liigveelaskmena kasutatakse kaheavalist raudbetoon lailäviülevoolu avade laiusena 2x7,1 m. Purila paisu kõrguseks on 0,95 m, paisutamise tulemusena tekkinud veekogu nimi on Purila paisjärv, paisjärvel vee erikasutusviis puudub. Liigveelaskmena kasutatakse 4-avalist kivebetoonist lailäviülevoolu avade laiusena 4x4,9 m. Lohu paisu kõrgus on 1,85 m, paisutamise tulemusena tekkinud veekogu nimetatakse Lohu paisjärveks, paisjärv on miljööväärne. Liigveelaskmena kasutatakse maakivimüüri ja betoonist kaheavalist ülevoolu (9,0 m ja 8,3 m laiade avadega). Mälivere paisu kõrguseks on 0,20 m, mille liigveelaskmeks on lagunenud vesikividest moodustatud lävendüleool, vee erikasutusviisiks on miljööväärne. Uustalu paisu kõrgus on 0,45 m, mille liigveelaskme moodustab kivekärstik, tekkinud paisjärve vett kasutatakse virgestuseks. Ingliste paisu

kõrgus on 0,80 m, liigveelaskmeks on 13,4 m pikkune ja 1,4 m laiune betoonist ülevool, mille keskel on varjadega suletav ava, vee erikasutusviisiks on miljööväärtus. (Keskkonnaagentuur 2016)

Keila jõel on registreeritud ka kaks pinnaveehaaret (Joonis 1.2). Keila jõe vett kasutavad Kohila vineeritehas (Kohila Vineer, OÜ) ning Keila-Joa mõisapark. Aastal 2015 oli Kohila vineeritehase pinnaveevõtukogus 850 m³, antud kogus veerežiimi oluliselt ei mõjuta. Keila-Joa mõisapargi pinnaveevõtukoguse kohta andmed puuduvad. (Keskkonnainfo 2017)



Joonis 1.2. Keila jõe paisude asukohad

Hüdroelektrijaam on Keila jõele rajatud Keila jõe kõrvale (Joonis 1.3). Hüdroelektrijaama juhitakse vesi mööda derivatsioonikanalit. Vee suunamiseks derivatsioonikanalisse on jõele ehitatud profiilpais, mille kõrguseks on 1,2 m ning pikkuseks 75 m. Paisutamisel tuleb tagada automaatne veetasemete mõõtmine. Kõrgeim paisutustase on merepinnast 22,62 m,

normaalpaisutustase 21,67 m merepinnast ja madalaim paisutustase 21,57 m merepinnast. Derivatsioonikanali pikkus on 100 m ja sügavus sealjuures 2 m. Hüdrolektriijaama võimsuseks on 365 kW ja keskmine toodang aastas umbes 2,5 GWh. Jaamas on üks reguleeritavate töö- ja juhtlabadega kaplan tüüpi 1 meetrise läbimõõduga turbiin. Turbiini nimivooluhulk on $5,5 \text{ m}^3/\text{sek}$, töörõhk 8,7 m. Paisust vahetult allpool olevas jõelõigus tuleb pidevalt tagada ökoloogiline miinimumvooluhulk $0,62 \text{ m}^3/\text{s}$ või looduslik äravool. Ajavahemikul 1. maist kuni 1. septembrini laupäevadel ja pühapäevadel ning riiklikel pühadel jõe vooluhulga korral alla $10 \text{ m}^3/\text{s}$ tuleb kell 12.00-20.00 kogu vooluhulk suunata Keila joale.



Joonis 1.3. Keila-Joa hüdrolektriijaam. Allikas: Ortofoto: Maa-amet 2017 (12.04.2017).

Keila jõgi kuulub kogu ulatuses lõhe, jõforelli, meriforelli ja harjuse kudemis- ja elupaikade nimistusse ning on lõheliste elupaigana kaitstav veekogu. Keila jõgi kuulub kas osaliste lõikudena või tervikuna riigi poolt korrashoitavate ühiseesvoolude loetellu. (Keskkonnaagentuur 2016)

Kalastiku praeguses koosseisu järgi kuulub jõe ülemjooks ja keskjooksu ülemine osa haugiahvena jõe ning keskjooksu alumine osa ja alamjooks ülalpool Keila-Joa juga särjejõe kalanduslikku tüüpi ja joast allpool olev suudme eelne osa on forelli- ja lõhejõe tüüpi (Järvekülg 2001:507). Kalapääsu Keila-Joa paisule rajada ei ole vaja kuna 6 meetri kõrgune juga on siirdekaladele ületamatu.

Käesolevas lõputöös modelleeritakse vooluhulgad AS Eesti Energiale kuuluval paisul. Hoolimata erinevatest keskkondlikest piirangutest on Keila-Joa hüdroelektrijaamas mõistlik hüdroenergiat toota. Hüdroenergeetilise potentsiaali arvutustes on arvesse võetud kõiki vee erikasutusloas sätestatud piiranguid.

2. EKSPERIMENDI METOODIKA

2.1. HYPE ja ArcSWAT protseduurid

HYPE'i puhul on tegemist kontseptuaalse valgla põhise hüdroloogilise mudeliga. HYPE mudelis jaotatakse jõe valgala alam-valgaladeks ja alam-valgalad jaotatakse omakorda sõltuvalt maakasutustüübist, mullast ja maapinna kaldest klassideks. Pinnas jaotatakse kolmeks vertikaalseks kihiks (seksiooniks). Need kolm vertikaalset pinnase kihti toimivad veereservuaaridena, mida täidab vihm, infiltratsioon, nõrgumine jne. Samal ajal tühjendab neid veereservuaare aurumine, äravool, taimede poolt kasutatav vesi, drenaaž jne. HYPE mudel on dünaamiline ehk mudel kirjeldab ajas muutuvaid sündmusi ja on ajast sõltuv. Mudeli parameetrid on kas üldised või mulla- ja maakattetüübist sõltuvad, parameetrid tuleb määrata käsitsi. Parameetrite vaikimisi väärtus on 0 ehk neid parameetreid, mille väärtusi kasutaja ise ei määra arvutustesse ei kaasata. Antud programm on välja töötatud Rootsi Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudis ning seetõttu on seda hetkel enim kasutatud Rootsi jõgede vooluhulkade modelleerimiseks.

Algselt plaaniti lõputöös kasutada mulla- ja maakasutusklasside loomiseks SMHI poolt arendatud programmi WHIST (World Hydrological Input Set-up Tool), kuid kuna sellele programmile pakutav alamvalgalade kaart on hetkel beetaversioonis on sellel alamvalgalade kaardil Keila jõel vaid 3 alamvalgala ja alamvalgalasid ise juurde lisada ei ole võimalik. Nii vähene alamvalgalade arv ei ole mudeli täpsuse suhtes piisav, seega valiti pinnase-ja mullaklasside loomiseks ArcGIS lisaprogramm ArcSWAT (Soil and Water Assessment Tool).

ArcSWAT'ist mulla- ja maakasutusklasside saamiseks tuleb esmalt sisestada programmi Keila jõe valgala kõrguskaart. Kõrguskaardi abil projitseerib ArcSWAT kaardile jõe ja selle harud. Seejärel loob ArcSWAT alamvalgalad. Järgmisena tuleb lisada maakasutus- ja mullakaardid. Seejärel arvutab ArcSWAT kõrguskaardi järgi alamvalgalade langused. Kui ka langused on arvutatud, siis saab eksportida tekstfaili, kus on andmed alamvalgalade ja nendel olevate mulla- ja maakasutusklasside kohta.

ArcSWAT'ist saadud andmete abil tuleb koostada failid, mis kirjeldavad alamvalgaladel olevaid mulla- ja maakasutusklassse. Järgnevalt tuleb määrata üldised ning mullast ja maakasutusest sõltuvad parameetrid. Seejärel tuleb koostada failid meteoroloogiliste vaatlusandmete kohta ja määrata vajalikud väljundandmed. Kui eelnimetatud protseduurid on sooritatud on võimalik koostada esialgne mudel.

Mudel kalibreeritakse perioodile 1968-1998. Kui kalibreeritud mudel on piisava tõhususega, siis valideeritakse kalibreeritud mudel perioodile 1998-2010. Valideerimisega saab hinnata mudeli tõhusust. Kui peale valideerimist selgub, et mudel on piisava tõhususega kasutatakse seda mudelit perioodi 2041-2100 vooluhulkade modelleerimisel, võttes arvesse kliimamuutuseid. Modelleerimise tulemusena saadud päevaste vooluhulkade järgi arvutatakse Keila jõe hüdroenergeetiline potentsiaal. Arvutatakse nii turbiinide päevane võimsus kui ka aastane tootlikkus. Saadud tulemuste põhjal antakse hinnang hüdroenergia muutuse mõjust ja tehakse ettepanekuid HEJ opereerimises.

2.2. Kliima sisend

Rahuldava tulemuse saamiseks vooluhulkade modelleerimisel on suur osatähtsus ilmastikuandmetel. Ilmastikuandmed lisatakse HYPE'i vaadeldud ja mõõdetud andmetena. Modelleerimiseks kohustuslikud ilmastiku andmed on: ööpäevane sademete hulk (mm) ja ööpäeva keskmine temperatuur (°C).

Võimalik on veel lisada valikulisi ilmastikuandmeid, milledest antud lõputöösse valisin: neto päikesekiirguse hulk päevas (MJ/m^2), keskmine suhteline õhuniiskus ööpäevas (%) ja päeva keskmine tuulekiirus (m/s). Lõputöös kasutati Riigi Ilmateenistuse meteoroloogilisi andmeid perioodil 1966-2010. HYPE-i lisati kokku Tabelis 2.1. toodud 4 erineva vaatlusjaama andmed.

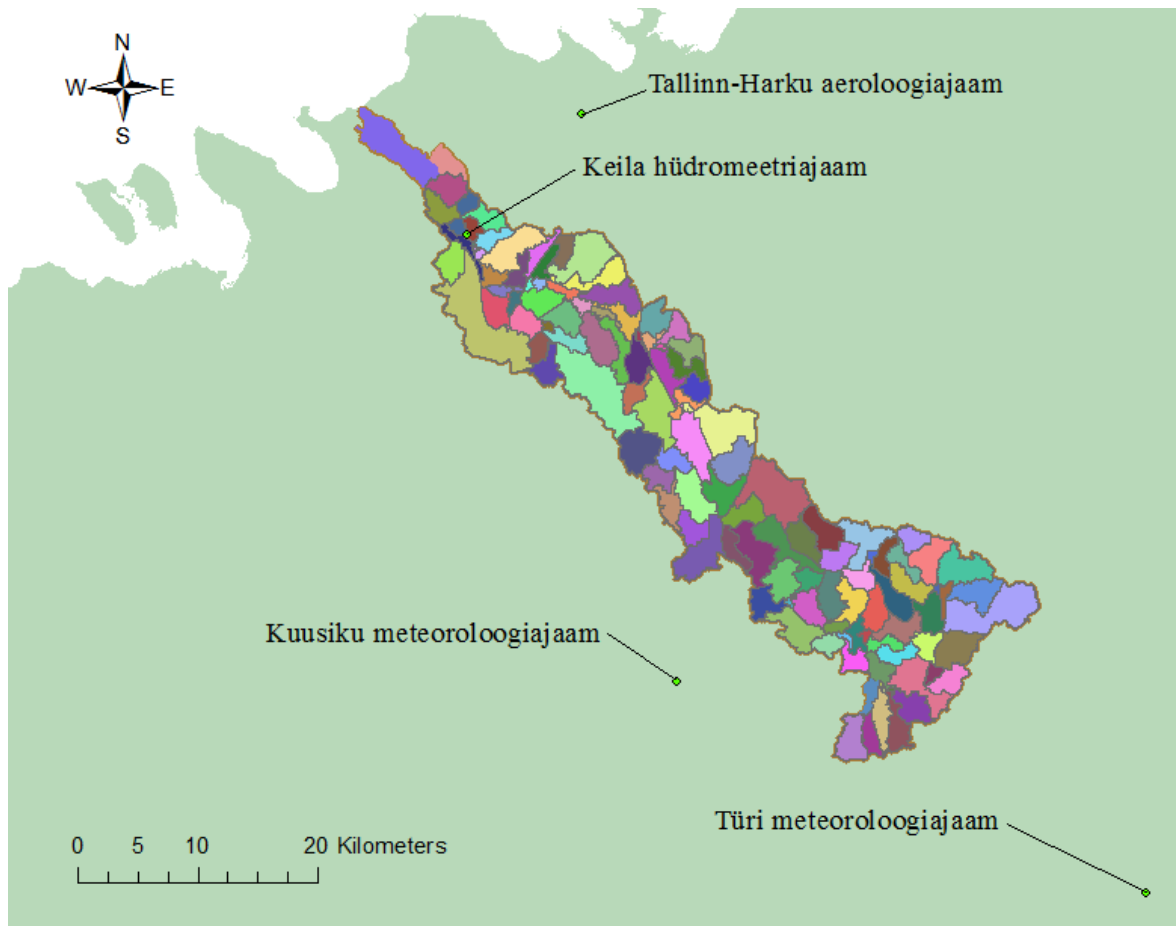
Tabel 2.1. Lõputöös kasutatavad mõõtmisjaamad

Jaam	Laiuskraad	Pikkuskraad	Kõrgus (m)
Kuusiku meteoroloogiajaam	N 58°58'23''	E 24°44'02''	53
Türi meteoroloogiajaam	N 58°48'31''	E 25°24'33''	60
Tallinn-Harku aeroloogiajaam	N 59°23'53''	E 24°36'10''	33
Keila hüdroomeetriaajaam	N 59°18'31''	E 24°26'05''	23.8

Kõik lõputöös kasutatavad ilmastikuandmed perioodile 1966-2010 olid olemas Kuusiku meteoroloogiajaamal ning Tallinn-Harku aeroloogiajaamal. Türi meteoroloogiajaamal puuduvad vaatlusandmed päikesekiirguse kohta ning Keila hüdroomeetriaajaamal on vaatlusandmed vaid sademete ja mõõtmisandmed jõe vooluhulkade kohta.

Puudulikud andmed esinesid ainult Keila hüdroomeetriaajas 2010. aasta detsembrikuu ööpäevase sademete hulga kohta. Kuna HYPE asendab puuduvad sademete andmed negatiivsete väärtustega ja selle tulemusena ei hakka mudel tööle, tähendab see, et puuduvaid andmeid ei tohi esineda. Kuna puuduvaid andmeid oli ainult ühe kuu ulatuses anti puudulike andmetega päevadele Tallinn-Harku aeroloogiajaama sademete vaatlusandmed. Muudes ilmavaatlusandmetes puudulikke andmeid ei esinenud.

Kuna HYPE-i ei ole võimalik sisestada ilmajaamade asukoha andmeid tuleb igale alamvalgalale ilmavaatlusandmed eraldi määrata olenevalt sellest, milline ilmavaatlusjaam asub alamvalgalale kõige lähemal. Alamvalgalale lähima ilmavaatlusjaama leidmiseks kasutati ArcGIS tööriista „Measure“, millega mõõdeti ilmavaatlusjaamade kaugust alamvalgalade keskpunktist (Joonis 2.1).



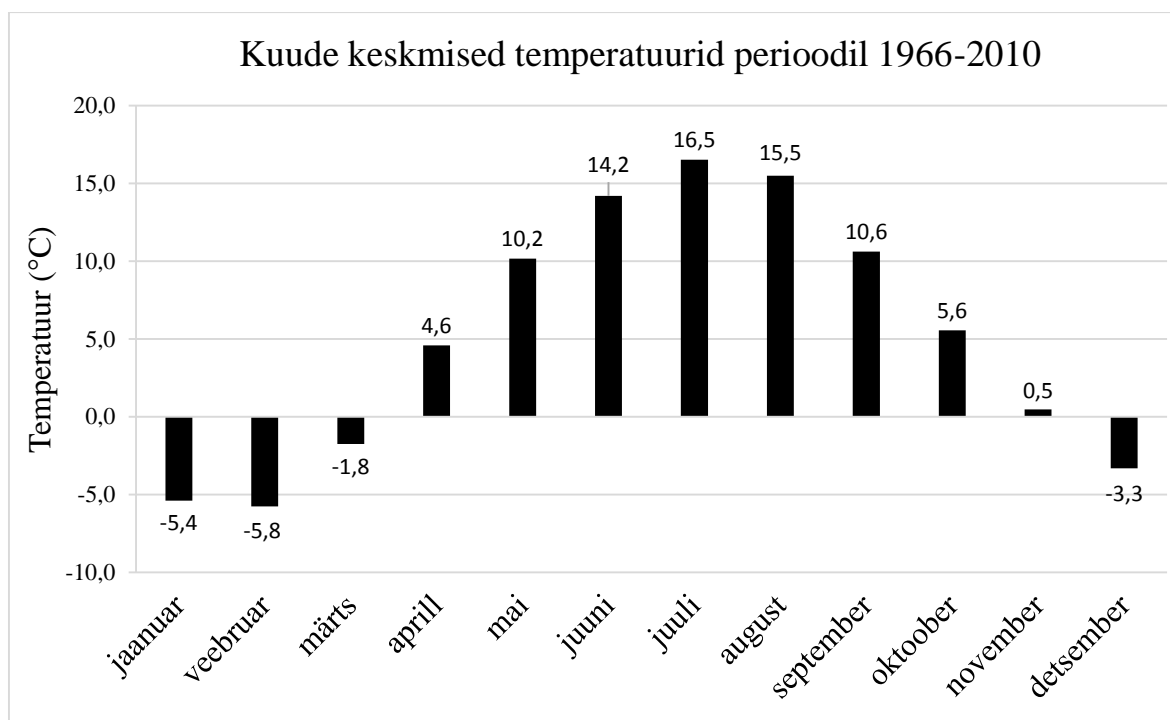
Joonis 2.1. Ilmavaatlusjaamade paiknemine Keila jõe 125 alamvalgala suhtes

Joonisel 2.1. on näha, et otseselt alamvalgalade piirkonnas asub ainult Keila hüdromeetriaajaam ülejäänud, Kuusiku ja Türi meteoroloogiajaamad ning Tallinn-Harku aeroloogiajaam ei asu alamvalgaladel.

2.2.1. Temperatuur

Ööpäevase keskmise temperatuuri sisend on HYPE'i jaoks kohustuslik, et vooluhulkasid mudeldada ja aurumist arvutada. Ööpäevane maksimaalse ja minimaalse temperatuuri lisamine pole küll kohustuslik, kuid täpsemate küllastunud auru rõhu väärtuste saamiseks lisatakse need siiski. Ööpäevast minimaalset ja maksimaalset temperatuuri saab hetkel kasutada ainult siis kui mudeldatakse ühepäevase intervalliga, mida lõputöös ka tehakse. Minimaalse ja maksimaalse temperatuuri abiga arvutatakse päevane päikesekiirguse hulk ja küllastunud auru rõhk. Päevase päikesekiirguse andmed on olemas seega kasutatakse minimaalset ja maksimaalset õhutemperatuuri ainult küllastunud auru rõhu arvutamiseks.

Aurumine on üks tähtsatest protsessidest, mis viib vee süsteemist välja seega on tegu vooluhulkade modelleerimisel tähtsa komponendiga. Keskmine temperatuur on arvutatud maksimaalse ja minimaalse temperatuuri järgi. Kõiki temperatuuri andmeid on vaja, et arvutada lumesulamise algust ja selle kestust.



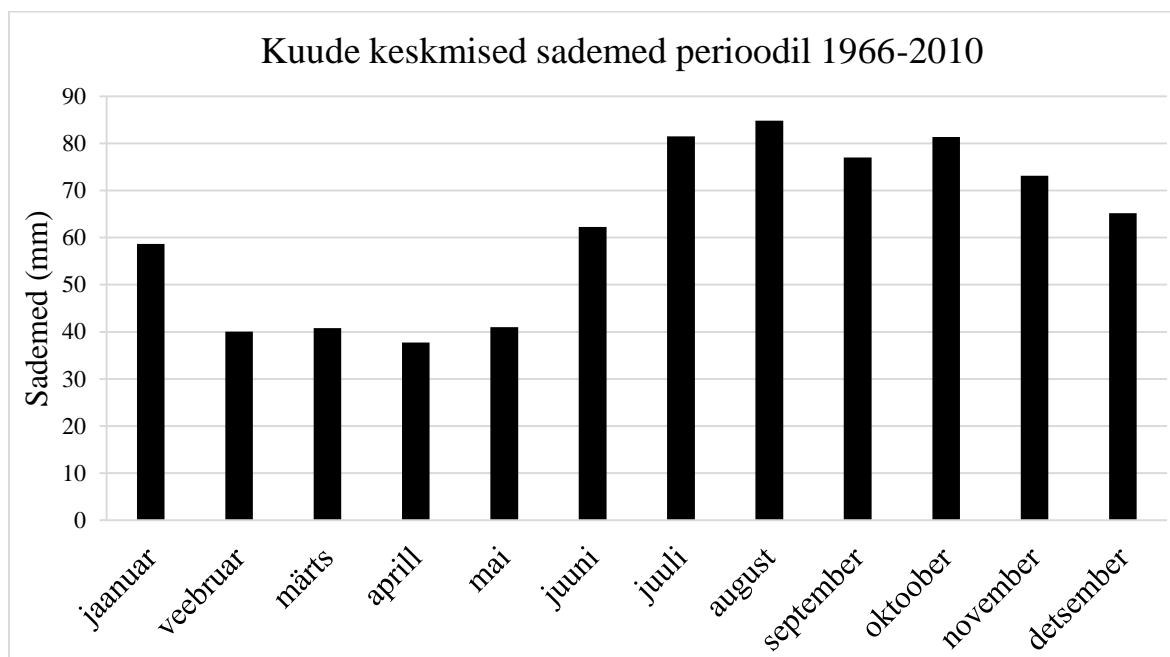
Joonis 2.2. Kuude keskmised õhutemperatuurid Kuusiku meteoroloogiajaamas perioodil 1966-2010

Kuude keskmine temperatuur Kuusiku meteoroloogiajaamas ajavahemikul 1966-2010 on 5,1°C ning see jääb 0,9°C alla Eesti pikaajalise keskmise temperatuuri (Keskmine õhutemperatuur (°C) 1981-2010). Kõige soojem kuu on juuli, mil keskmine õhutemperatuur on 16,5°C ning kõige külmem kuu on veebruar, mil keskmine temperatuur on -5,8°C. Kuusiku meteoroloogiajaamas on kõrgeimaks mõõdetud õhutemperatuuriks 34,3°C ja madalaimaks mõõdetud õhutemperatuuriks -40,6°C.

2.2.2. Sademed

Sademed on teiseks kohustuslikuks sisendiks, et HYPE saaks vooluhulkasid modelleerida. Täpsed sademete andmed on väga olulised vooluhulkade korrektseks modelleerimiseks. Sademete andmed on tähtsad sellepärast, et sademete kaudu siseneb süsteemi vesi. Kuna

sademetel on oluline osa veebilansi mõjutamisel kasutatakse kõiki Keila jõe lähistel asuvaid mõõtmisjaamu. Mõõtmisandmetele on Riigi Ilmateenistuse poolt lisatud märgamispärand, mis arvestab mõõtmisjaamas tekkivat mõõtmisviga. Sademete mõõtmisviga tekib mõõtmisanumas tekkiva tuulekeerise tõttu. Tuulekeerised takistavad väiksemate vihmapiiskade ja lumehelveste jõudmist mõõtmisanumasse.



Joonis 2.3. Kuude keskmised sademed Keila hüdromeetriaajas 1966-2010

Mõõtmisandmetele on Riigi Ilmateenistuse poolt lisatud märgamispärand, mis arvestab mõõtmisjaamas tekkivat mõõtmisviga. Sademete mõõtmisviga tekib mõõtmisanumas tekkiva tuulekeerise tõttu. Tuulekeerised takistavad väiksemate vihmapiiskade ja lumehelveste jõudmist mõõtmisanumasse.

2.2.3. Päikesekiirgus

Päikesekiirguse sisend ei ole HYPE'i jaoks vooluhulkade modelleerimiseks kohustuslik, kuid mudeli täpsuse huvides lisati ka päikesekiirguse andmed. Kui päikesekiirguse sisendit ei lisataks, prognoosiks HYPE vajalikud andmed päikesekiirguse arvutamiseks maksimaalse ja minimaalse temperatuuri või keskmiste temperatuuride järgi. Päikesekiirguse andmete abil arvutab HYPE lumesulamise kiiruse, jää sulamise kiiruse jõel ja järvedel ning potentsiaalse aurustumise.

Riigi Ilmateenistus on mõõtnud päikesepaiste kestust tundides päevas. HYPE mudelile aga on vajalik päevane neto lühilaineline päikesekiirus. Seega tuleb arvutada päikesepaiste kestuse järgi päevas, päevane summaarne lühilaineline päikesekiirus (R_s) Angstrom-Prescott'i valemiga:

$$R_s = R_a \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) [MJ \ m^{-2} d^{-1}], \quad (2.1)$$

kus R_a – maaväline kiirus ($MJ \ m^{-2} d^{-1}$);

a_s – atmosfäärne kiirguse osa täispilves päeval ($n=0$);

a_s+b_s – atmosfäärilise kiirguse osa üleni pilvitul päeval;

n – päikesepaiste kestvus h ;

N – päeva pikkus h ;

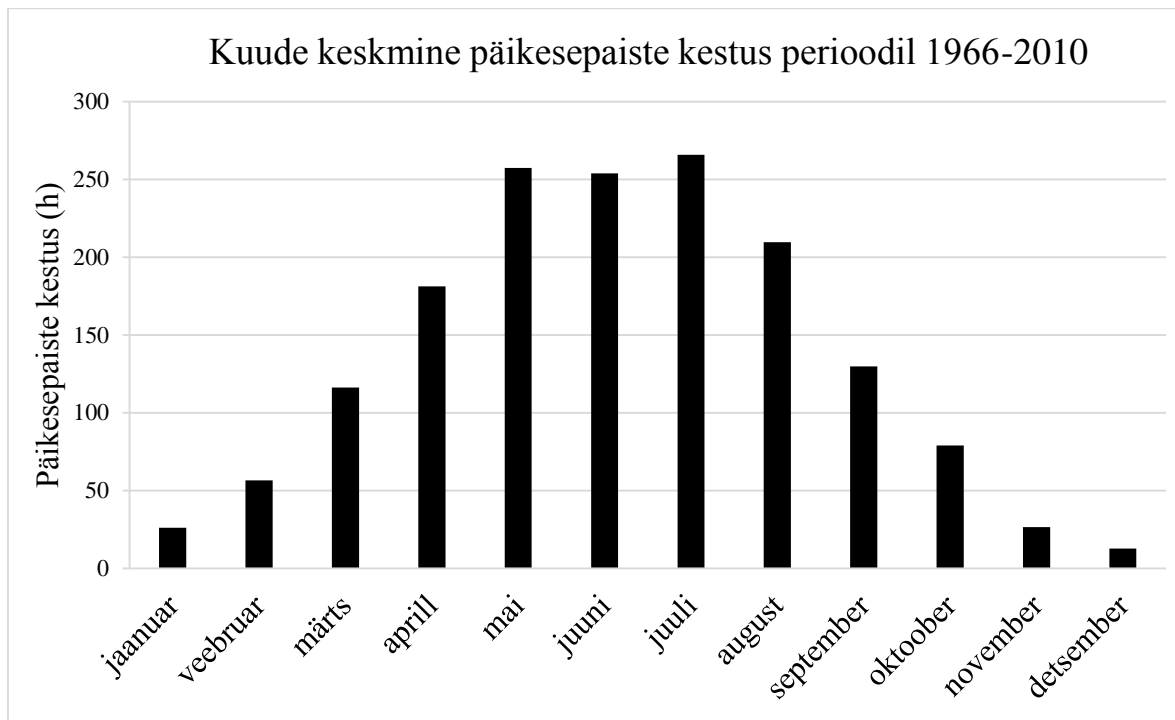
n/N – pilvisuse fraktsioon.

Väärtused a_s ja b_s on saadud Eesti tingimustele empiirilisel meetodil ning nad sõltuvad kalendrikuust. Kasutatud parameetrid on toodud tabelis 2.2 (Tamm 2002: 41).

Tabel 2.2. Empiirilised a_s ja b_s väärtused

Kuu	a_s	b_s
jaanuar	0,26	0,48
veebruar	0,27	0,52
märts	0,25	0,54
aprill	0,21	0,57
mai	0,2	0,57
juuni	0,2	0,57
juuli	0,2	0,55
august	0,2	0,55
september	0,2	0,56
oktoober	0,19	0,55
november	0,19	0,57
detsember	0,24	0,52

Lähim päikesepaiste kestuse mõõtmisjaam Keila jõele on Kuusiku meteoroloogiajaam.



Joonis 2.4. Kuude keskmine päikesepaiste kestus perioodil 1966-2010 Kuusiku meteoroloogiajaamas

Päikesepaiste kestus aastas on keskmiselt 1614 tundi, mis on 152 tundi vähem, kui Eesti pikaajaline keskmine, milleks on 1766 tundi (Päikesepaiste kestus (tundi) 1981-2010). Kõige rohkem paistis päike juulis – 266 tundi ja kõige vähem jaanuaris – 26 tundi (Joonis 2.4.).

2.2.4. Suhteline õhuniiskus

Suhtelise õhuniiskuse andmete lisamine HYPE-i ei ole küll kohustuslik, aga kuna HYPE arvutab suhtelise õhuniiskuse järgi potentsiaalse evapotranspiratsiooni lisati mudeli täpsuse huvides ka suhtelise õhuniiskuse andmed HYPE-i. Kui suhtelise õhuniiskuse andmeid HYPE-i ei lisata ennustab HYPE suhtelise õhuniiskuse teistest andmetest, mis aga võib osutuda ebatäpseks. Suhtelise õhuniiskuse andmeid kasutatakse peale potentsiaalse evapotranspiratsiooni arvutamise veel ka küllastunud auru rõhu defitsiidi leidmiseks.

2.2.5. Tuule kiirus

Tuule kiirus on samuti valikuline sisendparameeter. Tuule kiiruse järgi arvutab HYPE potsentsiaalse evapotranspiratsiooni. Kui tuulekiiruse andmeid ei lisata, siis HYPE ennustab tuule kiiruse teiste parameetrite järgi. HYPE eeldab, et tuule kiiruse informatsioon on kogutud 2,0 meetri kõrguselt, kuid Riigi Ilmateenistus mõõdab tuule kiirust 10 meetri kõrguselt. Seega tuleb arvutada teoreetiline tuule kiirus 2,0 meetri kõrgusel maapinnast (Valem 2.1). Selleks kasutatakse valemit (Haltiner, Martin 1957):

$$v_{z2} = v_{z1} \cdot \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{aa}, \quad (2.2.)$$

, kus v_{z1} – tuule kiirus m/s, kõrgusel z_1 m;

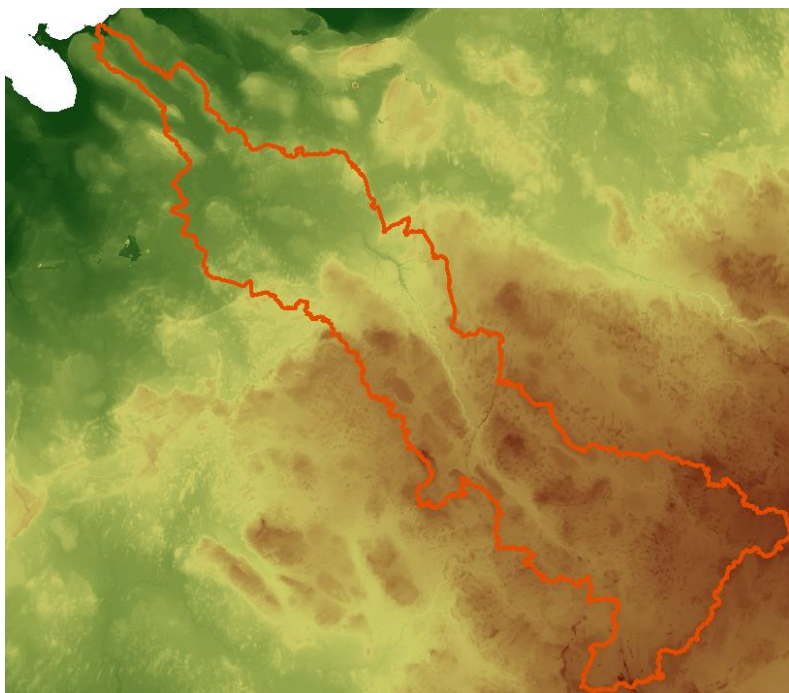
v_{z2} – tuule kiirus m/s, kõrgusel z_2 m;

aa – empiiriline konstant, mis sõltub atmosfäärilisest stabiilsusest ja pinnase karedusest.

2.3. Mulla, maakasutuse ja topograafia sisendid

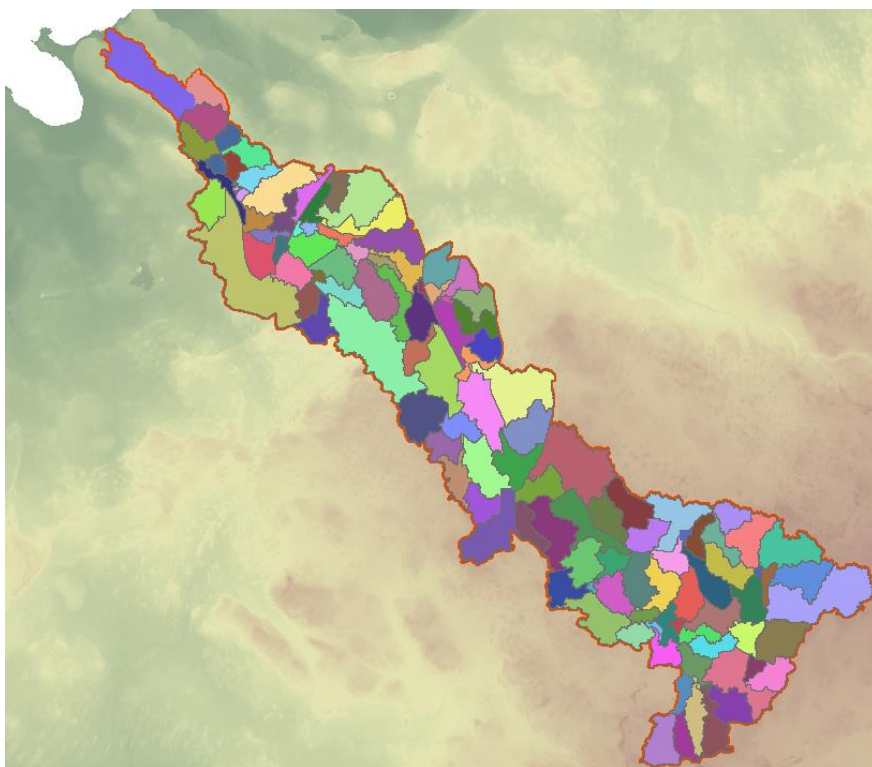
2.3.1. Topograafia

Kõrguskaardi järgi (Joonis 2.5) projitseerib ArcSWAT kaardile jõe ja selle harude asukohad. Kui jõe ja selle harude asukohad on kaardile projekteeritud saab ArcSWAT jagada jõe valgala alamvalgaladeks. Alamvalgaladeks jagamine on vajalik seepärast, et ühe valgalaga opereerimine ei taga mudeli piisavat täpsust. Lõputöös kasutati 10 m täpsusega rasterformaadis kõrguskaarti. Kümne meetrise täpsusega kaart on piisavalt täpne, et kirjeldada Keila jõe valgala üldist reljeefi. ArcSWAT'i järgi on jõe valgala 686 km², erinedes tegelikust valgala suurusest vaid 16,7 km² võrra. Keila jõe valgala jaguneb omakorda 125-ks alamvalgalaks (Joonis 2.6) ja nende suurus jääb vahemikku 0,06 km² ja 28,81 km².



Joonis 2.5. Keila jõe valgala kõrguskaart

Keila jõe valgala kõrguskaart saadi Eesti Maaülikooli nooremteaduri Ottar Tamme käest. Kõrguskaardi järgi arvutab ArcSWAT langud. Võttes arvesse Keila jõe valgala reljeefi, jaotati langud viite erinevasse klassi: 0-10 %, 10-20 %, 20-30 %, 30-50 % ja 50-100 %.



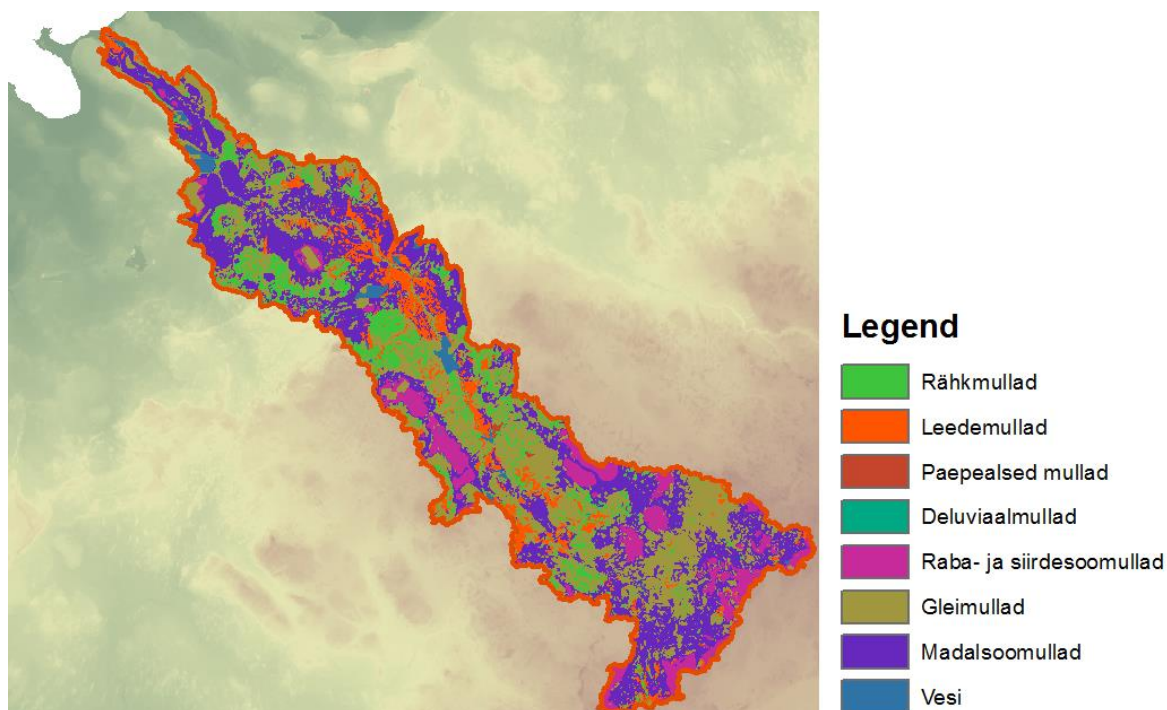
Joonis 2.6. Keila jõe valgala ja alamvalgalade jaotus

2.3.2. Mullad

Mullakaart saadi Maa-ameti Geoportaalist. Kaardi mõõtkavaks on 1:10 000. Mullastiku kaart koostati Maa-ameti tellimusel vahemikus juuli 1997 kuni märts 2001. Digitaalkaart koostati DGN formaadis ning Eesti põhikaardi koordinaatsüsteemis. Kaardi koostamise aluseks võeti suurmajandite ja metskondade mullastiku kaardid. Varem 1:5000 mõõtkavas koostatud kaardid vähendati ja generaliseeriti 1:10 000 mõõtkavale vastavalt. Vektorformaadis andmestik läbis aastatel 2012 kuni 2015 ulatusliku tehnilise korrastamise. (Maa-ameti Geoportaal)

Kuna Maa-ameti geoportaalist saadud mullastiku kaart oli vektorformaadis tuli see ümber konverteerida ArcSWAT'ile sobivaks rasterkaardiks. Ka mullatüübid tuli muuta ArcSWAT'ile arusaadavaks.

Mullakaart omab vooluhulkade modelleerimisel suurt tähtsust, sest HYPE'is muldadele antud parameetrite väärtuste järgi modelleeritakse vee liikumine pinnases ja mööda pinda. HYPE arvutab mulla parameetrite järgi pinnases oleva vee taseme, mullaniiskuse puudujäägi taimede juurte piirkonnas, maa külmumissügavuse, infiltratsiooni toimumise kiiruse ja kapillaartõusu mõju.

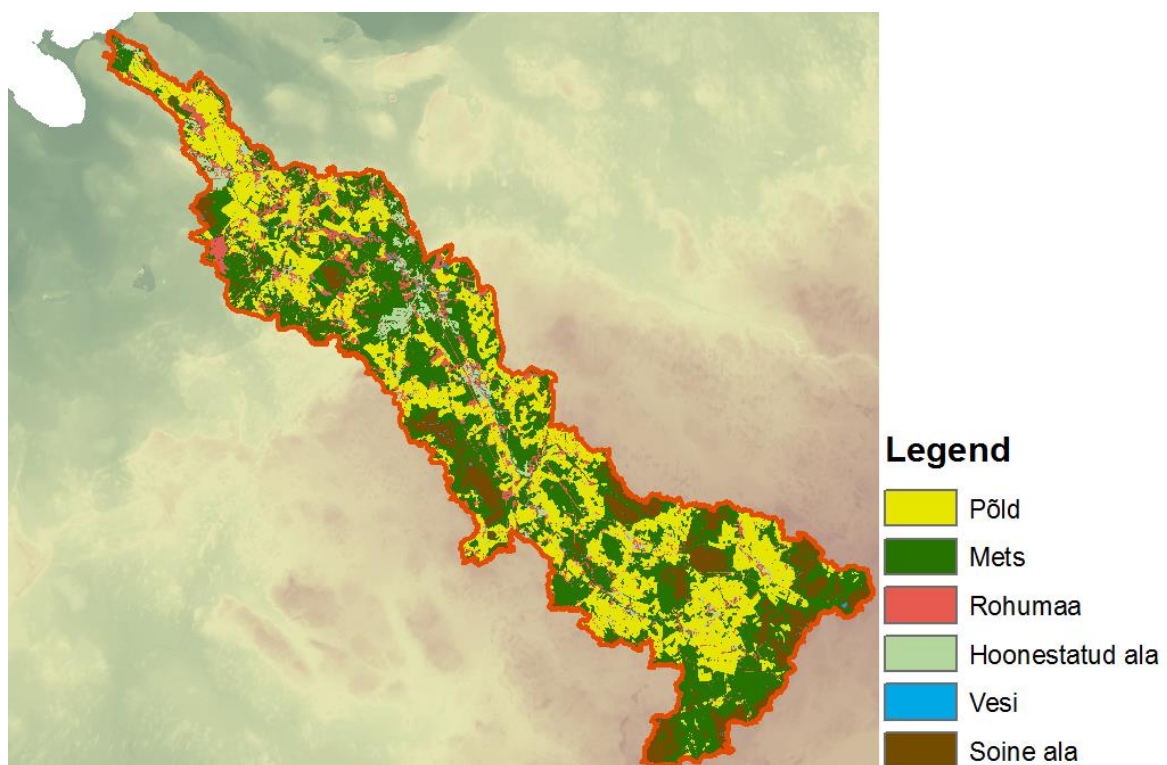


Joonis 2.7. Keila jõe valgala mullakaart

Keila jõe valgala territooriumil asub seitse erinevat põhimullatüüpi (Joonis 2.7). Enim levinud mullatüübiks on madalsoomullad 38 %, millele järgnevad gleistunud mullad 36 %. Ülejäänud mullatüüpe esineb Keila jõe valgjalal alla 10 %. Vesi on jäetud mullatüübina sisse sellepärast, et HYPE teaks, kui suure osa alamvalgala pindalast moodustab vesi.

2.3.3. Maakasutus

Maakattekaart saadi Eesti Maaülikooli nooremteaduri Ottar Tamme käest, kes muutis maakattekaardi ArcSWAT programmiga kasutatavaks. Maakattekaardina kasutatakse ETAK (Eesti topograafiline andmekogu) kaarti. Eestis on levinud kaks maakattekaarti: Corine ning eelnimetatud ETAK. ETAK-i puhul on tegemist täpsema kaardiga, kus peale aerolaserskänneri andmete kasutatakse ka välitööde kaardistamismeetodit, mis tagab Corine'st täpsema kaardistuse (Tamm 2013).



Joonis 2.8. Keila jõe valgala maakatte kaart

Keila jõe valgjalal enimlevinud maakattetüüpideks on (Joonis 2.8) mets 45 % ja põld 35 %, ülejäänud maakattetüüpe esineb valgjalal alla 10%.

2.3.4. Mulla- ja maakasutustüüpide kombinatsiooni klassid

Kui ArcSWAT'i protseduurid on tehtud tuleb saadud andmete põhjal koostada HYPE'i jaoks failid GeoClass ja GeoData, mis sisaldavad andmeid mulla- ja maakasutustüüpide kombinatsiooni klasside kohta. Mulla- ja maakasutustüüpide kombinatsiooni klassidega jagatakse alamvalgalad mulla ja maakasutuse järgi erinevateks osadeks. HYPE'is kasutatakse mulla- ja maakasutuskombinatsiooni klasside kohta lühendit SLC (Soil type – Land use Combination). SLC klassid HYPE'is töötavad hüdroloogilise ühisuse ühikuna HRU'dena (hydrological response unit). Jagades alamvalgalad SLC klasside järgi osadeks on mudelil võimalik paremini hinnata erinevusi evapotranspiratsioonis ja teistes hüdroloogilistes protsessides.

Failis Geoclass määratakse SLC klasside arv ja nende karakteristikud. GeoData faili kirjutatakse iga alamvalgala kohta järgnevad andmed:

1. Alamvalgala järjekorranumber
2. Alamvalgala järjekorranumber, kuhu suubub antud valgalast vesi
3. Alamvalgala pindala
4. Alamvalgalal oleva jõeharu pikkus
5. Keskmine langus (%)
6. Alamvalgala keskmine kõrgus
7. Alamvalgal olevate SLC klasside pindalad

Geodata failis peavad olema alamvalgalad järjestatud jõe voolamise suunas.

2.4. Kliimamudel perioodile 2041-2100

Tuleviku vooluhulkade modelleerimiseks on vaja tuleviku kliima muutuse andmeid. Kliimaparameetrite muutuste kohta andmete saamiseks kasutati Keskkonnaagentuuri poolt tehtud projekti „Eesti riikliku kliimamuutuste mõjuga kohanemise strateegia ja rakenduskava ettepaneku väljatöötamine“ lisa: „Eesti tuleviku kliimastsenaariumid aastani 2100“. Kliimaprojektsioonid Eesti jaoks on jagatud kaheks perioodiks: 2041-2070 ja 2071-2100. Keskkonnaagentuur tugines Eesti tuleviku kliimastsenaariumi koostamisel IPCC

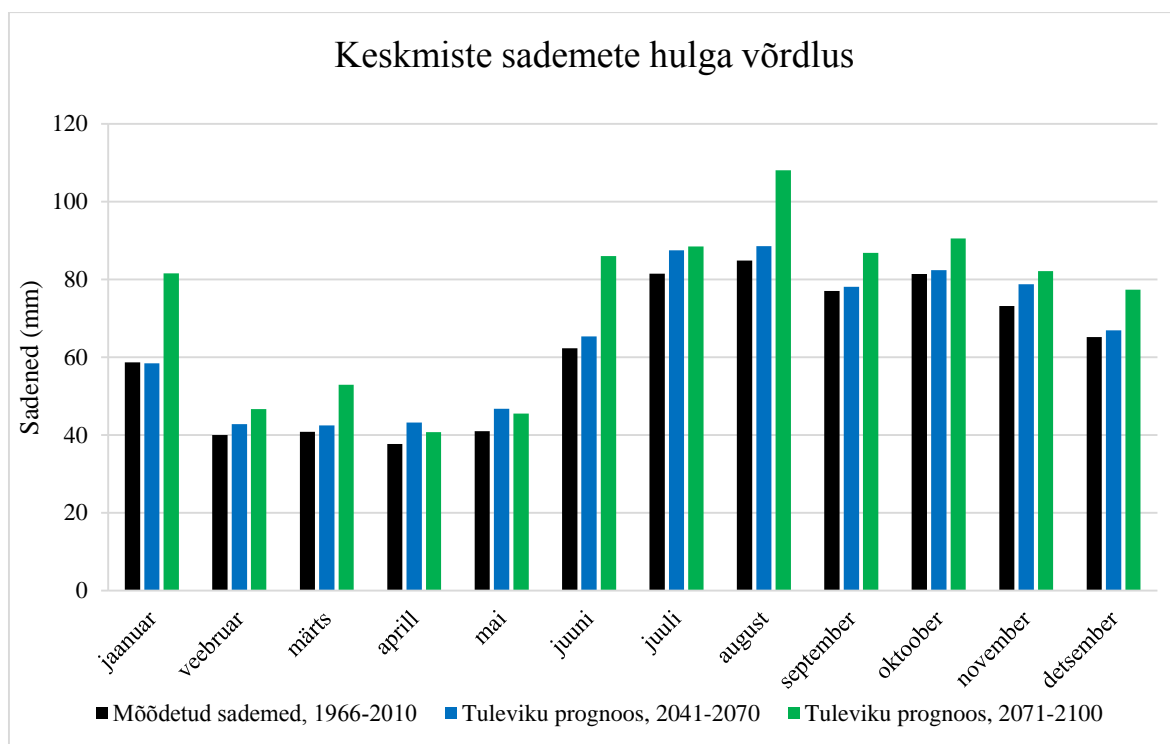
(Intergovernmental Panel on Climate Change) viiendale hinnangute aruandele AR5 (Assessment Report 5). Keskkonnaagentuur kasutas oma töö koostamisel kolme erinevat EURO-CORDEX projekti mudelit: RCA4, DMI-HIRHAM5, KNMIRACMO22 ja kahte erinevat kliimastsenaariumit RCP8.5 (pessimistlik lisastsenaarium) ja RCP4.5 (mõõdukas soovitatav põhistsenaarium). Lõputöös valiti kliimastsenaariumiks, mille järgi võeti kaardilt sademete hulga ja temperatuuri muutuse andmed Keila jõe valgalal RCP4.5 (Representative Concentration Pathway) kuna see on soovitatav põhistsenaarium.

Põhistsenaarium RCP4.5 eeldab, et emissioonide tipp jääb 21. sajandi sisse ja kiirguslikud mõjud sajandi lõpuks on $4,5 \text{ W/m}^2$. Eeldatakse ka, et kõik maailma riigid võtavad kasvuhoonegaaside emissioonide piiramise ette ja teevad seda sarnastel alustel, lõputöös kasutatud stsenaariumi majandusmudeli puhul on selleks kasvuhoonegaaside emissioonide maksustamine vastavalt nende saja-aastasele soojendamise potentsiaalile. RCP kirjeldab erinevaid võimalikke inimtegevusest põhjustatud kasvuhoonegaaside emissioone ja nendest tulenevaid kasvuhoonegaaside kontsentratsioone, lisaks võtab RCP arvesse lühiajaliste kasvuhoonegaaside võimalikke kontsentratsioone ja maakasutuse muutusi. RCP-de puhul on püütud arvesse võtta ka kliimamuutuse tagasisidet ühiskonna arengule. (Eesti tuleviku kliimastsenaariumid 2014)

Lõputöös võeti temperatuuri ja sademete muutuse väärtused kolme kliimamudeliga saadud tulevikuprojektsioonide keskmised.

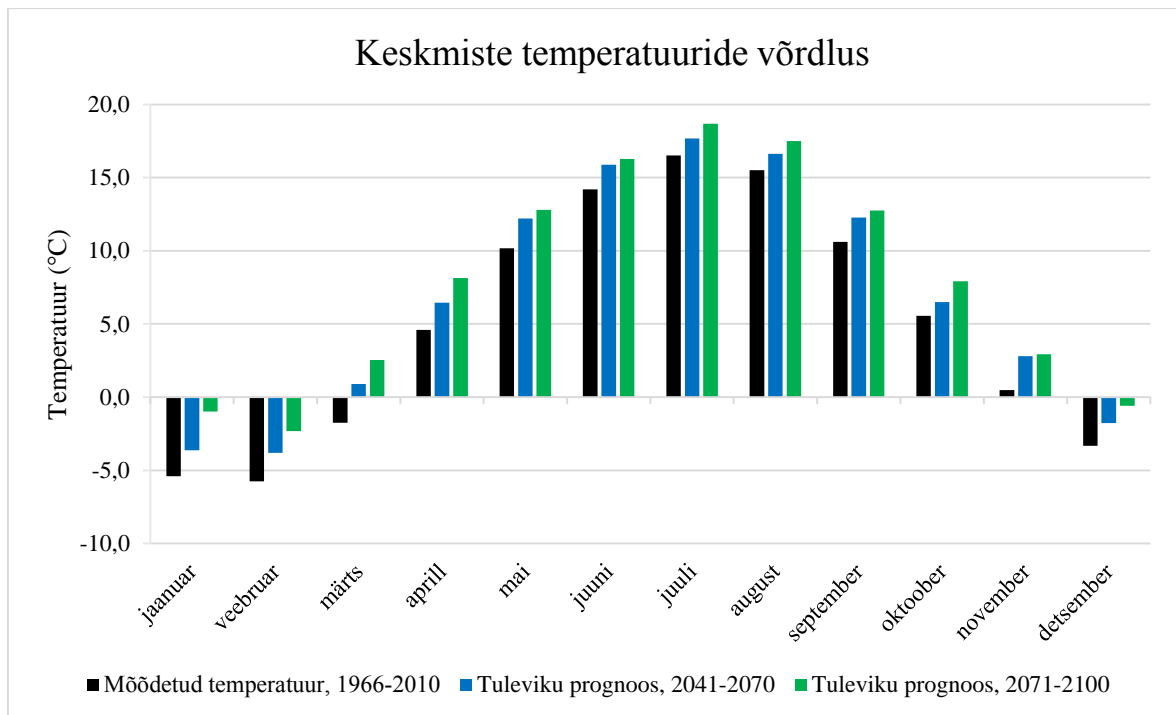
Joonisel 2.9 on näha keskmiste sademete hulga võrdlus. Keskmine sademete hulk aastas perioodil 1966-2010 on 743 mm, perioodil 2041-2070 on selleks 781 mm ja perioodil 2071-2100 on keskmine sademete hulk aastas 887 mm. Seega prognoosib kliimamudel aastase keskmise sademete hulga kasvu perioodil 2041-2070 võrreldes perioodiga 1966-2010 keskmiselt 38 mm, mis tähendab 5 protsendilist kasvu. Enim suureneb sademete hulk aprilli kuus, mil sademete hulga kasv on 13 % ja mai kuus 12 % ülejäänud kuudel jääb kasv alla 10 %. Jaanuarikuus sademete hulk prognoosi järgi väheneb ligi 2 %. Võrreldes perioode 1966-2010 ja 2071-2100 näeme, et keskmiste sademete hulga suurenemist prognoosib kliimastsenaarium perioodil 2071-2100 kõigil kuudel. Suurimat sademete hulga kasvu prognoositakse jaanuari, märtsi, juuni ja augusti kuudeks. Eelnimetatud kuudel prognoositakse kuude keskmine sademete hulga muutust üle 20 %. Väiksemat sademete hulga kasvu prognoositakse aprilli, mai ja juuli kuudeks, mil kuude keskmine keskmiste

sademetes hulga kasv jääb alla 10 %. Perioodil 2071-2100 võrreldes perioodiga 1966-2010 kasvab prognoosi järgi keskmiste sademete hulk aastas 143 mm ehk kasv on 19 %. Võrreldes perioode 2041-2070 ja 2071-2100 näeme, et kliimastsenaarium prognoosib perioodiks 2071-2100 aastase keskmise sademete hulga kasvu 105 mm (ligi 14 %).



Joonis 2.9. Keskmiste sademete võrdlus perioodidel 1966-2010, 2041-2070 ja 2071-2100 Keila hüdromeetriaajas

Keskmine õhutemperatuur perioodil 1966-2010 on 5,1 °C. Perioodiks 2041-2070 prognoosib kliimastsenaarium keskmise temperatuuri tõusu 1,7 °C, keskmiseks temperatuuriks sel perioodil on seega 6,8 °C. Enim tõuseb keskmine temperatuur märtsi ja aprilli kuus, mil keskmine temperatuur tõuseb üle 2 °C (Joonis 2.10). Teistel kuudel jääb keskmise temperatuuri tõus 0,9-1,9 °C piiridesse. Perioodil 2071-2100 on prognoosi kohaselt aastane keskmine õhutemperatuur 8,0 °C (Joonis 2.10), mis tähendab et võrreldes perioodiga 1966-2010 prognoositakse keskmise temperatuuri tõusu 2,9 °C. Kõige rohkem prognoositakse keskmise temperatuuri tõusu jaanuarist aprillini, mil keskmine õhutemperatuur tõuseb 3,5-4,4°C. Teistel kuudel jääb õhutemperatuuri tõus prognoosi järgi 2,0-2,6 °C piiridesse.



Joonis 2.10. Keskmiste temperatuuride võrdlus perioodidel 1966-2010 ja 2071-2100 Kuusiku meteoroloogiajaamas

Talviste õhutemperatuuride tõusu tõttu muutub Keila jõe jääkatteperiood lühemaks või ei teki jääkatet enam üldse, selle tulemusena suureneb talvine jõe äravool ja väheneb kevadine tippvooluhulk, sest sademed ei akumulereuks enam lumena. Keskmise temperatuuri tõus tähendab ka seda, et aurumine nii pinnalt kui ka taimedelt suureneb ja vegetatsiooniaeg pikeneb.

2.5. Kalibreerimine

Lisatavatest andmetest hoolimata jääb mudelisse ebamäärasusi. Ebamäärasused võivad tekkida mõõtmisvigadest, vigadest mulla ja maakasutuse parameetrite määramisel, ka mudelis endas on ebamäärasused, sest füüsikalisi protsesse 100 protsendilise täpsusega modelleerida ei ole võimalik. Selle põhjuseks on arvutustes kasutatavates valemities tehtud lihtsustused ja looduses esinev mitmekesisus. Mudelis olevate ebamäärasuste tõttu teostati vajaliku täpsusega mudeli saamiseks kalibreerimine ja valideerimine.

Saamaks rahuldava efektiivsusega mudel, teostati kalibreerimine ja valideerimine. Kalibreerimine on tõhusamate parameetrite vahemike otsimine, saamaks mõõdetud

vooluhulkadega paremat kattuvust ja valideerimine on protsess, kus mudelit testitakse kalibreeritud parameetritega (Tamm 2013). Valideerimise puhul on tegu mudeldamise eelviimase protsessiga, hindamaks mudeli efektiivsust. Viimasena sooritatakse kalibreeritud mudeli järgi tuleviku voluhulkade modelleerimine. Kuna mudeli käivitamisel puudub süsteemis vesi jäetakse mudelile kahe aasta pikkune „soojendusaeg“. Kalibreerimiseks kasutatakse ajavahemikku 1968-1998. Mudeli valideerimiseks jäetakse aastad 1998-2010 HYPE'is on võimalik kalibreerimise tulemusi hinnata 17 erineva otsustusfunktsiooni abil, võimalik on ka täpsustada, millise otsustusfunktsiooni järgi soovitakse välja valida parim parameetrite komplekt. Lõputöös hinnatakse kalibreerimise ja valideerimise tulemusi Nash-Sutcliffe'i efektiivsuse (NSE) koefitsiendiga kuna Sevat ja Dexetter (1991) leidsid, et NSE on parim otsustusfunktsioon kajastamaks üleüldist hüdrograafi sobivust. Nash-Sutcliffe efektiivsus on normitud statistiline töötlusviis (Valem 2.5) (Nash, Sutcliffe 1970). Nash-Sutcliffe'i efektiivsuse koefitsient näitab, kui hästi modelleerimisega saadud tulemused vastavad vaadeldule. NSE arvutatakse järgneva valemiga:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{mean})^2} \right], \quad (2.5)$$

kus Y_i^{obs} – vaadeldud voluhulk i-ndal päeval;

Y_i^{sim} – modelleeritud voluhulk i-ndal päeval;

Y_{mean} – vaadeldud voluhulkade väärtus antud perioodil.

Teoreetiliselt võivad NSE väärtused kõikuda $-\infty$ kuni 1,0 piirides (1,0 kaasa arvatud). Parimat mudeli efektiivsust näitab NSE väärtus 1,0. Väärtuseid, mis on vahemikus 0,50 ja 1,0 peetakse rahuldatavateks. Kui $NSE \leq 0,0$ tähendab see, et vaadeldud voluhulkade keskmine väärtus on parem prognoosija, kui modelleeritud väärtused. (Tabel 2.3).

Tabel 2.3. Nash-Sutcliffe efektiivsuse koefitsiendi hindamiskriteeriumid (Moriassi, D. N. et al. 2007)

Efektiivsus	Vahemik
Väga hea	$0,75 < NSE \leq 1,0$
Hea	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Rahuldav	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Ebarahuldav	$NSE \leq 0,50$

Lisaks NSE'le hinnatakse kalibreerimise ja valideerimise tulemusi ka Kling-Gupta efektiivsuse (KGE) koefitsiendiga (Gupta et al. 2009). Kling-Gupta efektiivsuse arvutamiseks kasutatakse järgnevat valemit (Kling et al. 2012):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}, \quad (2.6)$$

kus r – modelleeritud ja vaadeldud vooluhulga korrelatsioonikoefitsient;

β – vaadeldud ja modelleeritud vooluhulkade keskmiste väärtuste suhtarv;

γ – vaadeldud ja modelleeritud vooluhulkade varieeruvuse suhtarv.

Sarnaselt NSE'le võivad ka KGE väärtused kõikuda piirides $-\infty$ kuni 1,0 (kaasa arvatud). Mudeli hindamiskriteeriumid saadud KGE väärtuse põhjal on toodud tabelis 2.3. KGE järgi loetakse mudeli efektiivsust rahuldavaks, kui $KGE > 0,50$ (Gupta et al. 1999).

Tabel 2.4. Kling-Gupta efektiivsuse koefitsiendi hindamiskriteeriumid (Thiemig et al. 2013)

Efektiivsus	Vahemik
Hea	$0,75 < KGE \leq 1,0$
Rahuldav	$0,50 < KGE \leq 0,75$
Kehv	$0,00 < KGE \leq 0,50$
Väga kehv	$KGE \leq 0,00$

Kalibreerimiseks tuleb koostada tekstifail, kus määratakse, milliseid mudeli parameetreid soovitakse kalibreerida ja millised on kalibreeritavate parameetrite väärtuste vahemikud. Kalibreerimis tekstifailis määratakse ka kalibreerimismeetod, mida soovitakse kasutada. HYPE'is on võimalik valida kaheksa erineva automaatse kalibreerimismeetodi vahel:

1. Monte Carlo simulatsioon (MC),
2. I progressiivne Monte Carlo simulatsioon (parameetrite vahemik piiratakse parimate seni leitud parameetritega (BP)),
3. II progressiivne Monte Carlo simulatsioon (parameetrite vahemikku piiratakse etappidena (SM)),
4. Diferentsiaalevolutsiooniline Markovi ahela meetod (DE),
5. Brent'i meetod (BN),
6. QuasiNewton DFP gradiendil põhinev meetod (Q1),
7. QuasiNewton BFGS gradiendil põhinev meetod (Q2),
8. Järsu laskumise meetod (SD).

Lisaks on võimalik mudelit kalibreerida ka käsitsi muutes üksikshaaval erinevaid parameetreid, kuid see on liialt ajakulukas ja tülikas.

Lõputöös valiti mudeli parameetrite kalibreerimiseks diferentsiaalevolutsiooniline Markovi ahela meetod (DE). Diferentsiaalevolutsiooniline Markovi ahela meetod on segu Markovi ahelast ja diferentsiaalevolutsioonist (Braak 2006).

Markovi ahelaks nimetatakse matemaatikas lõpliku või loenduva olekute hulgaga diskreetse ajaga juhuslikku protsessi, millel on Markovi omadus (Serfozo 2009). Markovi omadus tähendab, et fikseeritud oleviku korral tulevik ei sõltu minevikust ehk olevikuseisundi kirjeldus sisaldab kogu informatsiooni, mis võib protsessi tulevast arengut mõjutada (Markov, Nagorny 1988). Ehk fikseeritud oleviku korral tulevased parameetrite väärtused ei sõltu parameetrite väärtustest minevikus. Markovi ahela tähtsaimaks omaduseks on omavahel vastastikku toimivate paralleelsete ahelate tekitamine (Smith, Marshall 2008).

Diferentsiaalevolutsiooni korral moodustub parameetrite väärtuste komplekt algsetest parameetritest ning uus parameetrite väärtuste komplekt luuakse kasutades parameetreid olemasolevas parameetrite väärtuste komplektis. Esimene uus parameeter tekib kahe eelneva parameetri ristamise tulemusena. Teine uus parameeter konstrueeritakse kasutades kolme erinevat parameetrit. Kuigi ristamise tulemusel tekib kaks uut parameetrit, aga vaja on ainult ühte jäetakse kõrvale parameeter, mis kirjeldab halvemini hüdrooloogilisi protsesse (Loolaid 2013: 19).

Sobiva meetodi valimise järgselt tuli valida generatsioonide ja populatsioonide (parameetrite komplektide) arv. Generatsioonide arvuks valiti 25 ja populatsioonide arvuks 150. See tähendab, et diferentsiaalevolutsioonilise Markovi ahela algoritmi järgi 150 parameetrite komplekti jooksutatakse paralleelsetes ahelates ja neid mutanteeritakse ja ristatakse 14 korda ehk kokku tehakse 2250 iteratsiooni. Järgmise sammuga valiti kalibreeritavad parameetrid ja nende füüsikaliselt tähenduslikud vahemikud. Kalibreerida saab ainult neid mudeli parameetreid, millele kasutaja on ise väärtuse andnud kuna eelsätestatud parameetrite väärtus on 0. Kalibreerimiseks valiti 28 mudeli parameetrit. Parameetrite väärtuste vahemik, mille piires kalibreerida määrati eraldi igale mulla- ja maakasutustüübile. Väärtuste vahemik

määrati ka üldistele parameetritele. See tähendab, et kokku kalibreeriti 119 mudeli parameetri väärtust.

Kui kalibreerimine õnnestub ($NSE > 0,50$, $KGE > 0,50$), siis tuleb mudel valideerida. Kui ka valideerimisperioodi NSE ja KGE väärtused on suuremad, kui 0,50 kasutatakse saadud mudelit vooluhulkade modelleerimiseks.

2.6. Elektrienergia arvutamine

Keila jõest saadava hüdroenergia arvutamiseks on lihtsustatud valemi järgi vajalik teada kolme parameetrit (Valem 2.5). Esiteks on vajalik teada üla- ja alaveetaseme vahe ehk netorõhk H (m). Mida suurem on üla- ja alaveetaseme vahe seda suurem on vee kukkumisjõud, mida suurem on vee kukkumisjõud seda suurema kiirusega pöörleb turbiin. Teiseks on vaja teada vooluhulka Q (m^3/s). Teoreetiline veejõud arvutatakse korrutades omavahel vooluhulga Q ja kõrguste vahe H raskuskiirendusega g (m/s^2). Kolmandaks tuleb teoreetiline veejõud korrutada kasuteguriga η . Kasutegur sõltub näiteks turbiini läbivast vooluhulgast, turbiini tüübist, kui efektiivselt muundatakse mehaaniline energia elektrienergiaks jne. Hüdroenergia arvutamise valem on:

$$P = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta, \quad (2.5)$$

kus P – jaama võimsus kW;

H – netorõhk m;

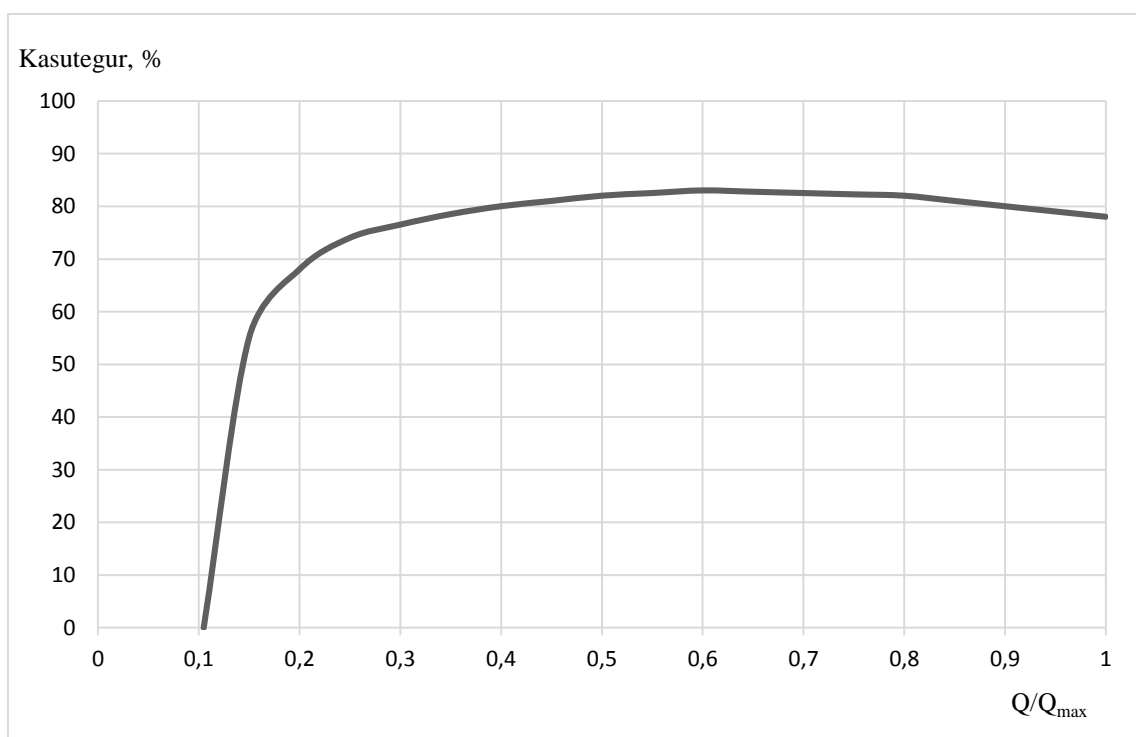
Q – vooluhulk m^3/s ;

g – raskuskiirendus m/s^2 ;

η – kasutegur %.

Keila jõel asuval Eesti Energia AS-le kuuluvas Keila-Joa hüdroelektrijaamas on tööõhk 8,7 m. Hüdroelektrijaamas on üks asünkroon-generaator ja üks reguleeritavate töö- ja juhtlabadega kaplan-tüüpi 1 meetrise läbimõõduga ja $5,5 m^3/s$ nimivooluhulgaga turbiin. Jaama võimus on 365 kW ja keskmine aastatoodang on umbes 2,5 GWh. Vee erikasutusloas sätestatud piirangu järgi ajavahemikul 1. maist kuni 1. septembrini laupäevadel ja pühapäevadel ning riiklikel pühadel jõe vooluhulga korral alla $10 m^3/s$ tuleb kell 12.00-20.00 kogu vooluhulk suunata Keila joale.

Kaplan-tüüpi turbiinid on Eesti hüdroelektrijaamades laialdaselt levinud oma efektiivsuse tõttu väikese vooluhulga ja netorõhu juures. Kaplan tüüpi turbiinile iseloomulikku efektiivsust näitab pööratavate labadega Kaplan turbiini efektiivsuskõver (Joonis 2.11). Kui osakoormus täiskoormusest on väiksem kui 20 % langeb turbiini kasutegur märgatavalt ja automaatika lülitab turbiini välja. Maksimaalne kasutegur on osakoormusel 60 % mil kasutegur on 83 %, peale selle osakoormuse ületamist hakkab kasutegur langema, aga mitte oluliselt. Arvutuste aluseks võeti kasuteguri määramisel antud efektiivsuse kõver.

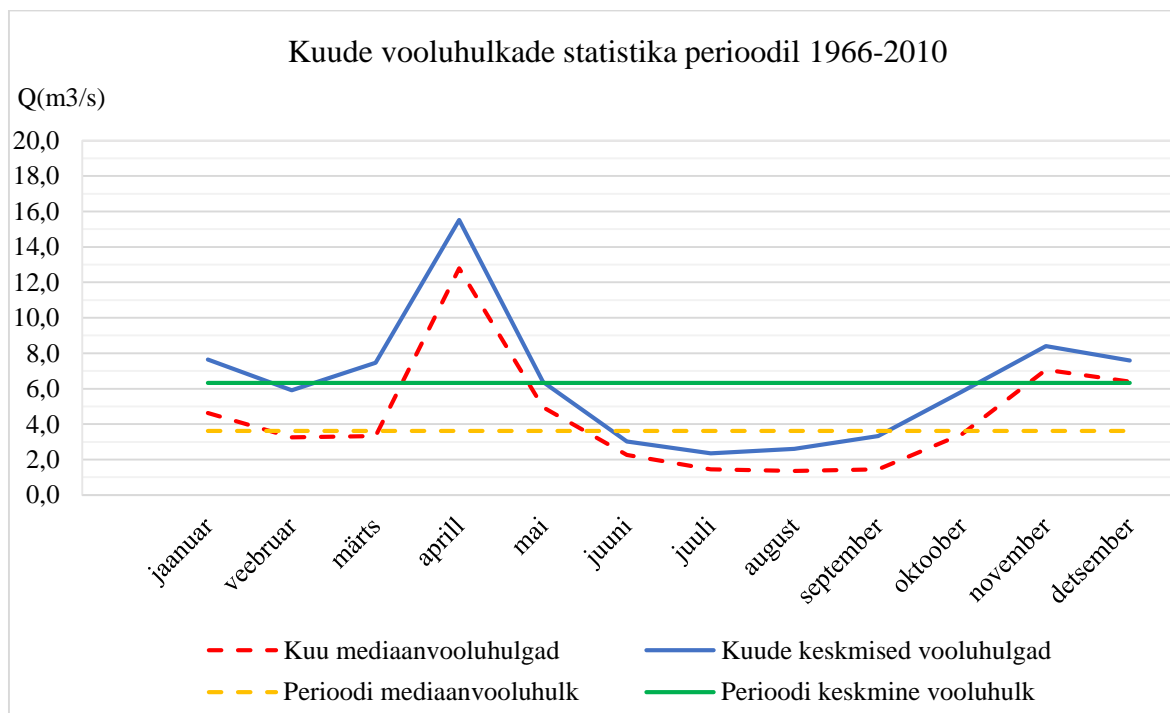


Joonis 2.11. Pööratavate labadega Kaplan turbiini kasutegur töötamisel osaliste vooluhulkadega

Vastavalt vee erikasutusloale peab paisust vahetult allpool olevas jõelõigus olema pidevalt tagatud ökoloogiline miinimumvooluhulk $0,62 \text{ m}^3/\text{s}$. Turbiin hakkab tööle, kui jõge läbiv vooluhulk ületab sanitaarvooluhulka ja turbiini jaoks vajalikku 20 % täiskoormust. Seega peab hüdroenergia tootmiseks olema vooluhulk jões vähemalt $1,10 + 0,62 = 1,72 \text{ m}^3/\text{s}$. Turbiin töötab täie võimsusega, kui vooluhulk jões on $5,5 + 0,62 = 6,12 \text{ m}^3/\text{s}$. Kui jõest tulev vooluhulk on suurem, kui turbiini maksimaalne võimsus, juhitakse ülejäänud vooluhulk turbiinist ja derivatsioonikanalist mööda.

3. TULEMUSED

Perioodil 1966-2010 on Keila hüdromeetriaajas mõõdetud Keila jõe aasta keskmine vooluhulk $6,33 \text{ m}^3/\text{s}$. Keila jõe iseloomulik kõrge tippvooluhulk esineb kevadel aprillis, mil läbi aastate kuu keskmine vooluhulk on $15,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Joonis 3.1) ületades aasta keskmist $9,2 \text{ m}^3/\text{s}$ võrra. Suveperioodi madalaim kuu keskmine vooluhulk leiab aset juulis, mil kuu keskmine vooluhulk on $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ olles aasta keskmisest $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ väiksem. Suveperioodil saab Keila jõgi oma põhilise vee põhjaveest. Vooluhulk tõuseb uuesti üle keskmise hilissügisel vihmaperioodil novembris, mil vooluhulk on $8,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ületades keskmist $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

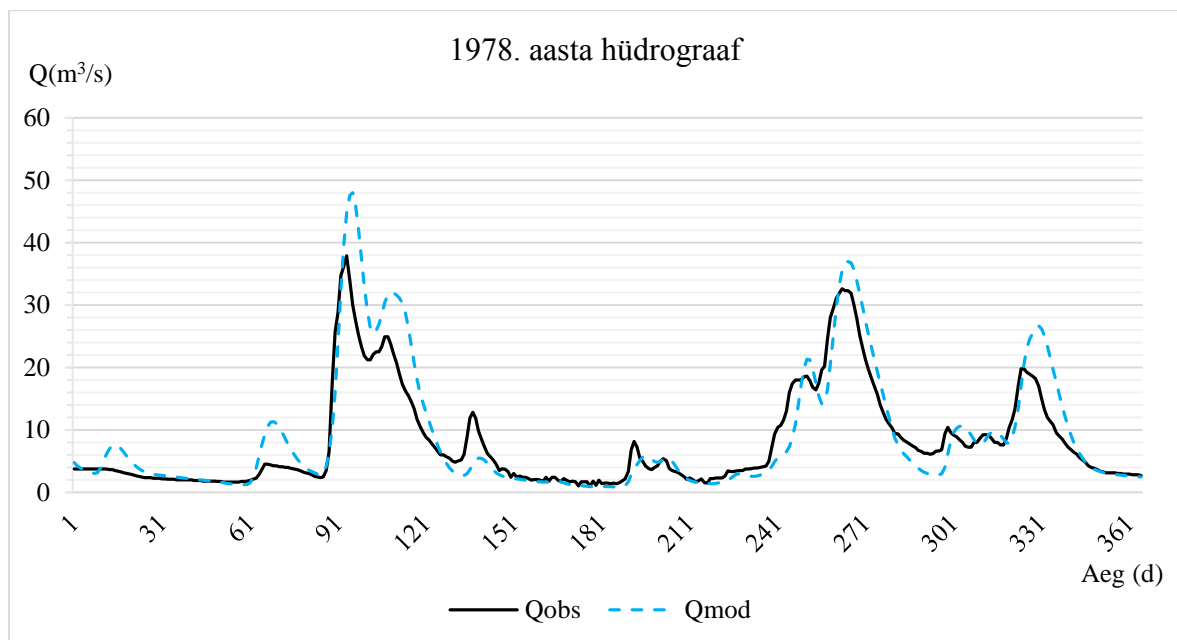


Joonis 3.1. Keila jõe kuude vooluhulkade statistika perioodil 1966-2010

Kuude keskmiste vooluhulkade hüdrograaf perioodil 1966-2010 (Joonis 3.1) iseloomustab Keila jõe tüüpilist vooluhulka. Kuid korrapärase aastate mõju kuude keskmised vooluhulgad ei kajasta. Kuude keskmised vooluhulgad ei kajasta näiteks olukorda, kui on lumevaene talv ja kevadised tippvooluhulgad on väikesed või kui on vihmarikas suvi, mis hoiab vooluhulkasid ja veetasel kõrgel. Selliseid olukordi on tavalises statistilises mudelis praktiliselt võimatu modelleerida rahuldava täpsusega, seega tuleb kasutada dünaamilist modelleerimist.

Modelleerides potentsiaalset hüdroenergiat tuleb analüüsida peale kuude keskmiste vooluhulkade ka kuude mediaanvooluhulki. Mediaanvooluhulk näitab Keila jõe vooluhulkade esinemist mediaankuudel. Analüüsides visuaalselt mediaanvooluhulki (Joonis 3.1) on näha, et võrreldes kuu keskmiste vooluhulkadega tuleb paremini esile sügisene novembrikuine tippvooluhulk. Aasta mediaankeskmine vooluhulk on aasta keskmisest vooluhulgast $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ väiksem. Suurim erinevus mediaan ja aasta keskmiste vooluhulkade vahel on märtsikuus, mil erinevus on $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Võrreldes mõõdetud andmeid (Q_{obs}) modelleeritud andmetega (Q_{sim}) on näha, et kontseptuaalne hüdroloogiline mudel on vooluhulkade modelleerimisel tõhus (Joonis 3.2). Hüdrograafilt on näha, et tegu on haruldase aastaga kuna sügisesed tippvooluhulgad leiavad aset novembri asemel septembrikuus ning on näha ka, et juulikuus on esinenud sajurohked päevad, mil jõe vooluhulgad ületavad pikaajalist juulikuu keskmist vooluhulka pea 4 korda. Statistilised mudelid jäävad selliste olukordade vooluhulkade prognoosimisel hätta ning taolised haruldased aastad silutakse statistika poolt ära. 1978 aasta hüdrograafi NSE väärtuseks on 0,60 ja KGE väärtuseks 0,73. Seega on tulemus rahuldav mõlema otsustusfunktsiooni järgi. Ka visuaalselt on näha modelleeritud vooluhulkade tõhusus, peamised erinevused esinevad vooluhulkade modelleerimisel, mis on suuremad kui $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

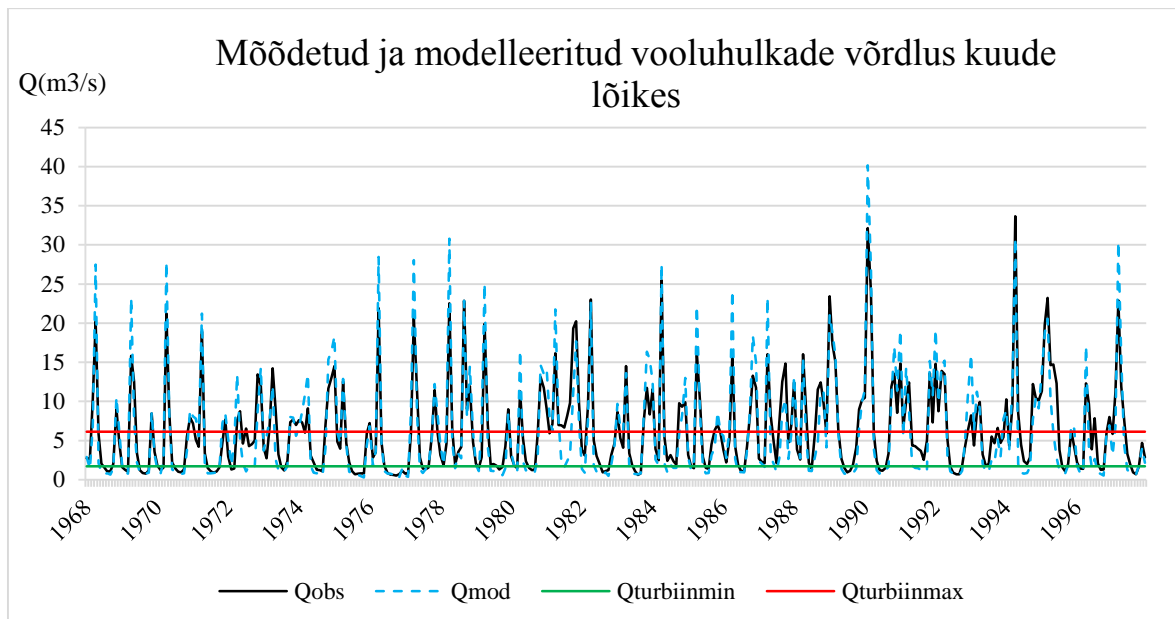


Joonis 3.2. Mõõdetud ja modelleeritud vooluhulgad 1978 aasta hüdrograafil

Kuigi 1978 aasta NSE väärtus on rahuldav, siis kogu vaadeldava perioodi (1966-2010) NSE väärtus on 0,48, mis tähendab ebarahuldavat tulemust. Antud perioodi KGE väärtuseks saadi 0,57, mis tähendab küll rahuldavat tulemust, kuid rahuldatud pole tingimus $NSE > 0,50$. Ebarahuldav tulemus tekib erinevatest ebamäärasustest. Ebamäärasusi on võimalik arvesse võtta ja vähendada mudeli kalibreerimisega. Selleks kasutati HYPE-i sisse ehitatud automaatset kalibreerimist, millega kalibreeriti diferentsiaalevolutsioonilise Markovi ahela meetodiga vaadeldud vooluhulkade järgi mudeli parameetrite väärtusi. Kalibreerimiseks valiti 28 tähtsamat mudeli parameetrit.

3.1. Kalibreering perioodile 1968-1997

Mudeli parameetrite kalibreerimine teostati perioodile 1968-1997. Diferentsiaalevolutsioonilise Markovi ahela algoritmi järgi jooksutati 150 parameetrite komplekti paralleelsetes ahelates ja neid mutanteeriti ja ristati 14 korda ehk kokku teostati 2250 iteratsiooni. Vooluhulkasid arvutati päevase sammuga, et saada reaalsemat ülevaadet Keila jõe hüdroenergeetilisest potentsiaalidest. Peamiseks otsustusfunktsiooniks HYPE'is parimate parameetrite väärtuste valimiseks määrati NSE. Kalibreerimise eesmärgiks oli leida mudeli parameetrite väärtused, mis rahuldavad seatud tingimusi: $NSE > 0,50$ ja $KGE > 0,50$. Kalibreerimise lõpus loob HYPE faili, kus on kirjas parameetrite väärtused, mis andsid parima tulemuse NSE järgi. Parima lahenduse kuu keskmised vooluhulgad kõrvutati visuaalselt mõõdetud andmetega (Joonis 3.3). Joonisel on näha mudeli ja vaadeldud andmete hea kattuvus.



Joonis 3.3. Mõõdetud vooluhulkade ja kalibreeritud mudeli parameetritega modelleeritud vooluhulkade võrdlus kuude lõikes perioodil 1968-1997

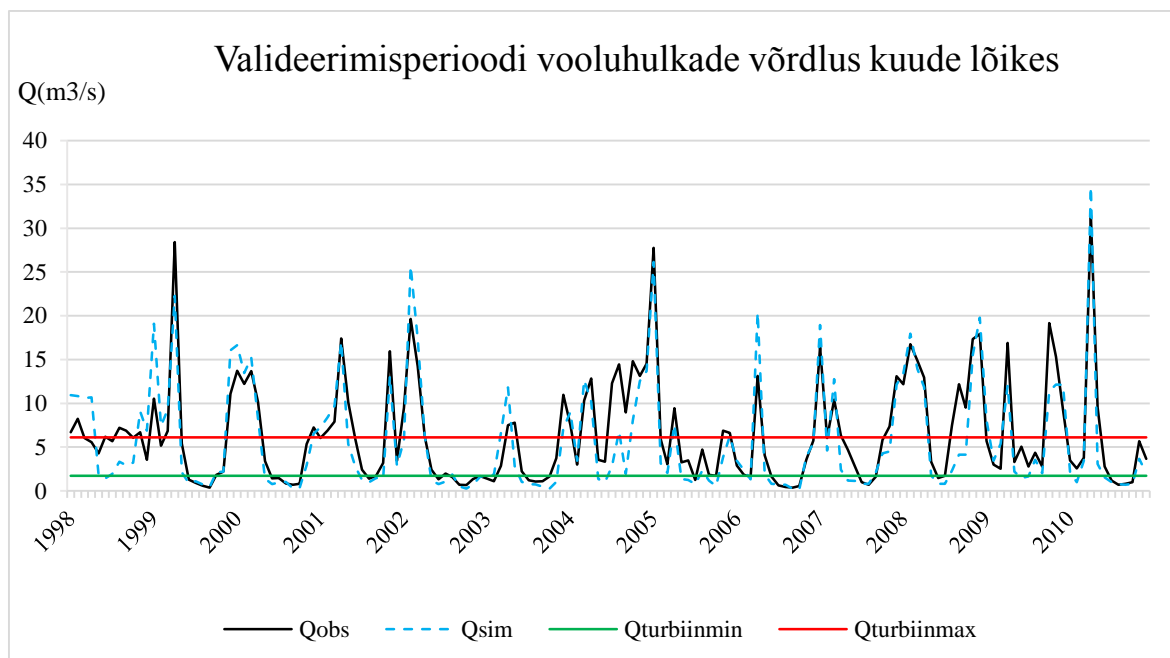
Antud joonis näitab visuaalselt mudeli efektiivsust kuude keskmiste vooluhulkade arvutamisel. Mudeli hindamiskriteeriumi NSE väärtus perioodile 1968-1997 on 0,66, mis tähendab head tulemust, KGE väärtus on 0,76, mis tähendab samuti head tulemust.

Kalibreerimisega ei suudetud eemaldada ebamäärasusi tippvooluhulkade modelleerimisel. Joonisel on näha erinevusi just tippvooluhulkades, mil HYPE hindab vooluhulki suuremaks, kui on mõõdetud vooluhulgad. Kuu keskmine vooluhulk võib tippvooluhulkade puhul erineda kuni $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Mõningaid erinevusi on näha ka neljal suveperioodil, kus mudel hindab vooluhulki väiksemaks, kui on mõõdetud. Kuu keskmised vooluhulgad neil suveperioodidel erinevad mõõdetust kuni $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

HYPE arvutab mudelile KGE ja NSE väärtuse kogu vaadeldud ja modelleeritud vooluhulkade vahemikku arvesse võttes, kuid kuna käesoleva lõputöö peamiseks eesmärgiks on Keila jõe hüdroenergeetilise potentsiaali määramine on olulisem see, kui hästi suudab mudel modelleerida vooluhulkasid selles vooluhulkade vahemikus, kus turbiin töötab. Seega arvutati KGE ja NSE väärtused mudelile eraldi ka vooluhulkade vahemikus $1,72 \text{ m}^3/\text{s}$ ja $6,12 \text{ m}^3/\text{s}$. Selle tulemusena saadi KGE ja NSE väärtusteks vastavalt 0,68 ja 0,59, mis on kehvemad kui kogu vooluhulkade vahemikku arvutustesse kaasates saadud väärtused, kuid siiski on täidetud nõue $\text{NSE} > 0,50$ ja $\text{KGE} > 0,50$.

3.2. Valideering perioodile 1998-2010

Vooluhulkade valideerimine näitab kuidas töötab kalibreeritud mudeli parameetrite vahemike kombinatsioon siis kui ülejäänud sisendparameetrid jäävad samaks.



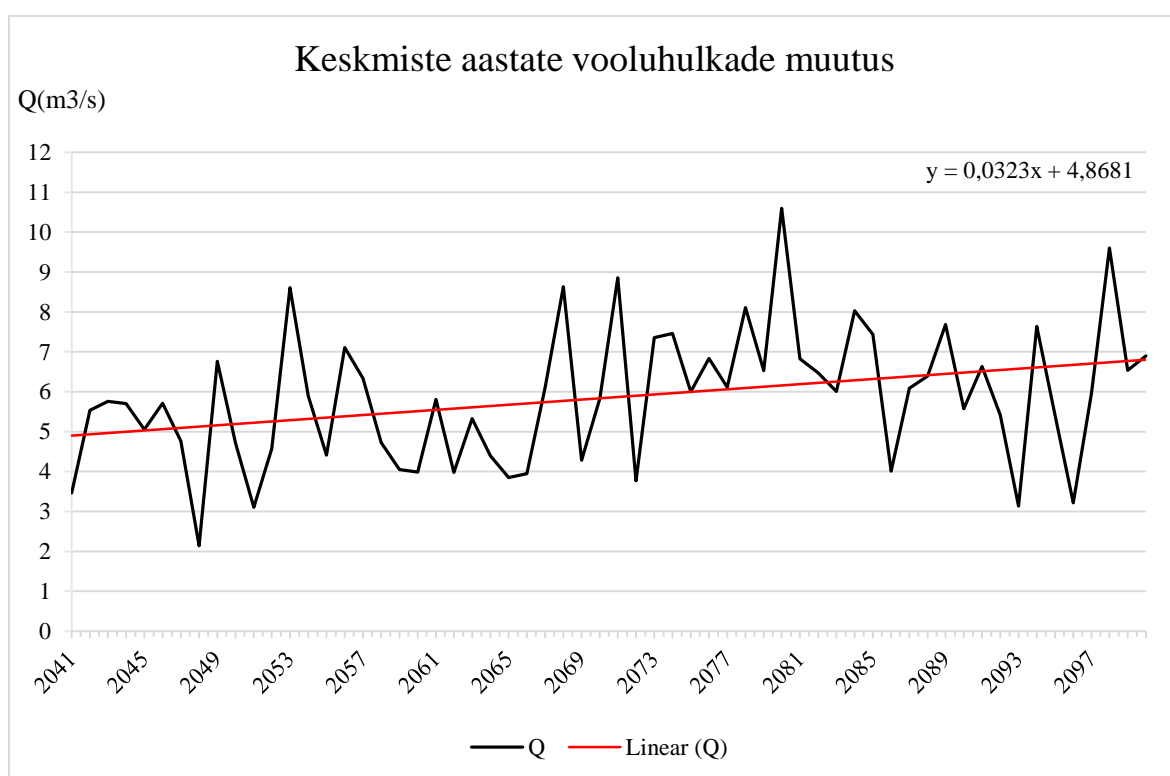
Joonis 3.4. Valideerimisperioodi vooluhulkade võrdlus kuude lõikes Keila hüdromeetriaajas

Visuaalselt hinnates kattuvad mõõdetud vooluhulgad modelleeritud vooluhulkadega hästi (Joonis 3.4). Kalibreeritud parameetritega mudeli NSE ja KGE väärtus kuude lõikes on vastavalt 0,63 ja 0,66, mis tähendab et mudel on mõlema otsustusfunktsiooni järgi rahuldava efektiivsusega. Sarnaselt kalibreeringule esinevad peamised erinevused tippvooluhulkade modelleerimisel, kus HYPE hindab vooluhulki tegelikust suuremaks. Sarnaselt kalibreeringule hindab HYPE ka mõnede suveperioodide vooluhulki madalamaks võrreldes mõõdetud tulemustega.

Mudeli KGE ja NSE väärtused arvutati valideerimisperioodile samuti eraldi vooluhulkade vahemikus 1,72-6,12 m³/s. KGE ja NSE väärtused saadi vastavalt 0,56 ja 0,61, mis on sarnaselt kalibreerimisperioodile kehvemad tulemused, kui kogu vooluhulkade vahemikku arvesse võttes. Kuid täidetud on nõue NSE>0,50 ja KGE>0,50 ja saadud parameetreid kasutatakse tuleviku vooluhulkade modelleerimisel.

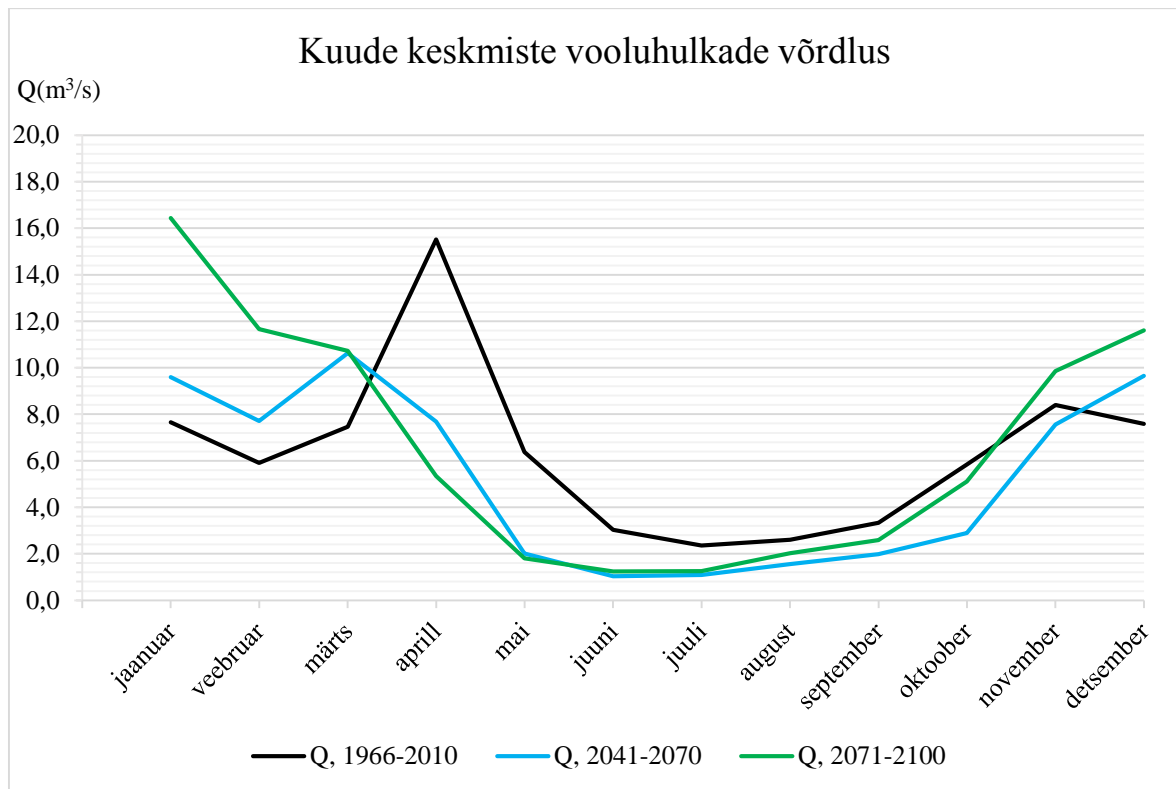
3.3. Vooluhulkade modelleerimine perioodiks 2041-2100

Kliimastsenaariumit arvesse võttes muudeti temperatuuri ja sademete andmeid vastavalt stsenaariumile. Vooluhulkade modelleerimiseks kasutati kalibreerimisel saadud mudeli parameetrite väärtusi. Mudel prognoosib aasta keskmiste vooluhulkade kasvu modelleeritud perioodil (Joonis 3.5). Perioodi 2041-2070 keskmine vooluhulk on prognoosi järgi 5,3 m³/s, mis on 1 m³/s väiksem, kui perioodi 1966-2010 keskmine vooluhulk, milleks on 6,3 m³/s. Perioodi 2071-2100 keskmiseks vooluhulgaks on prognoosi järgi 6,6 m³/s, mis tähendab võrreldes perioodiga 1966-2010 keskmise vooluhulga kasvu 0,3 m³/s.



Joonis 3.5. Keskmiste aastate vooluhulkade muutus perioodil 2041-2100

Joonisel 3.6 on näha, kuidas muutuvad tulevikus kuude keskmised vooluhulgad.

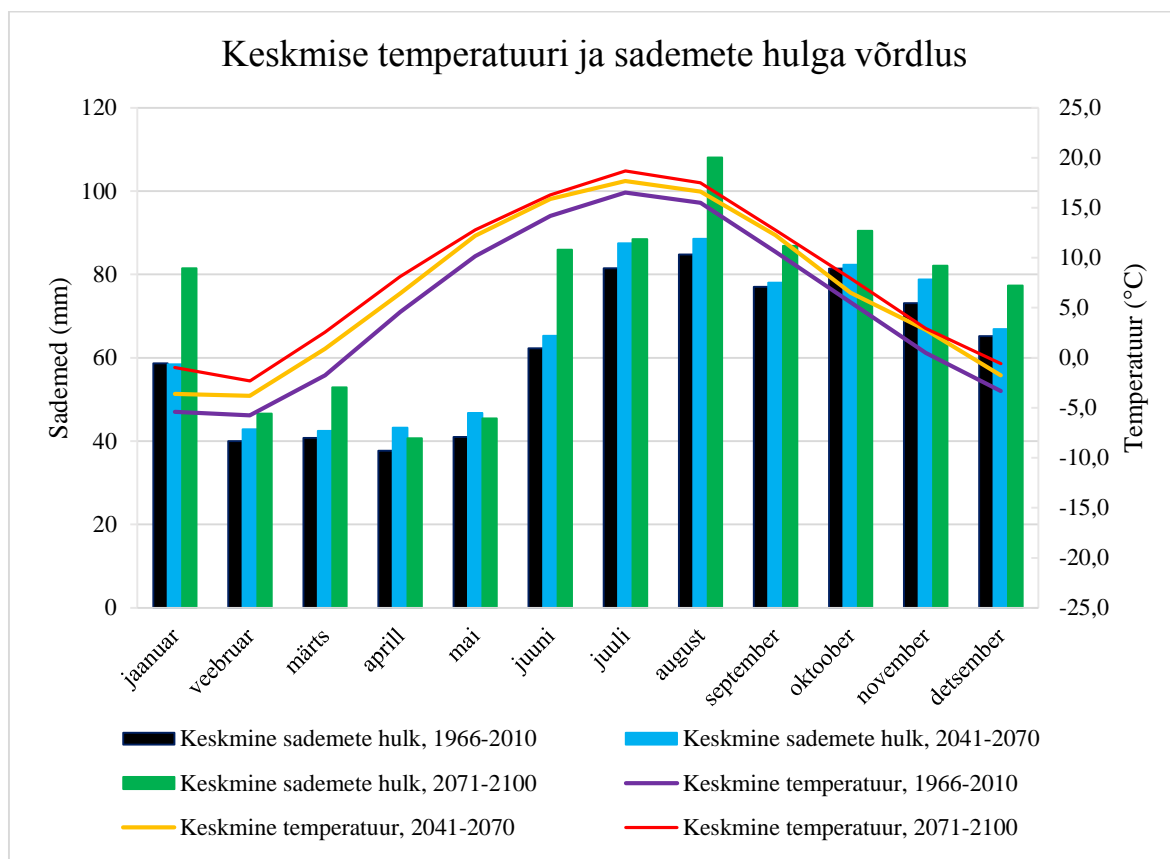


Joonis 3.6. Keila jõe kuude keskmiste vooluhulkade võrdlus perioodidel 1966-2010, 2041-2070 ja 2071-2100

Kuude keskmiste vooluhulkade võrdlemisel on näha, et perioodil 2041-2070 nihkub kevadine tippvooluhulk võrreldes perioodiga 1966-2010 aprilli kuust märtsikuuse. Perioodil 2041-2070 on kevadised tippvooluhulgad ka väiksemad, mis on seletatav sellega, et keskmiste temperatuuride tõusu tõttu ei akumuleeru sademed lumena või sulab mingi osa lund enne kevadisi tippvooluhulkasid ära. Vaadates perioodi 2071-2100 on näha, et tippvooluhulga esinemise aeg on nihkunud kliimamuutuste tõttu jaanuari kuusse. Perioodidel 2041-2070 ja 2071-2100 on enamusel kuudel keskmine vooluhulk väiksem, kui perioodil 1966-2010, tulevikus on keskmine vooluhulk suurem hilissügis- ja talveperioodil. Võrreldes omavahel tulevikuperioode on näha, et suve- ja kevadkuudel on muutus keskmistes vooluhulkades väike, suurem on erinevus sügis- ja talvekuude keskmistes vooluhulkades.

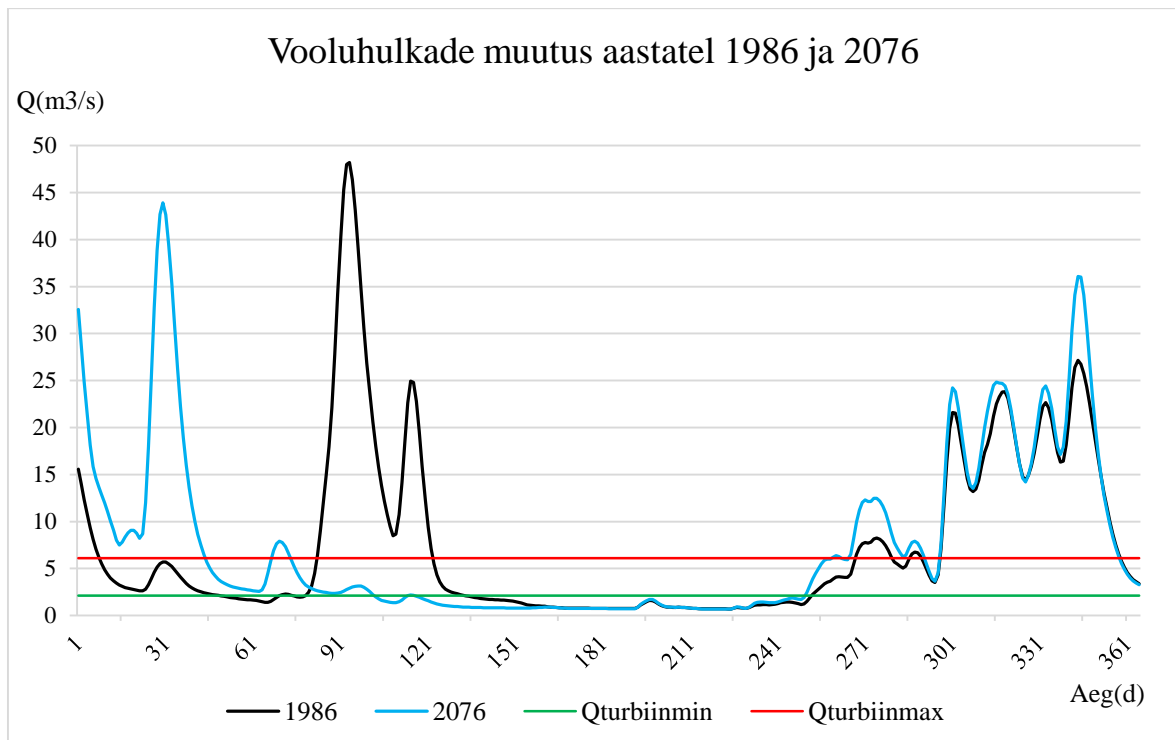
Sademetega kaudu siseneb süsteemi vesi ja perioodil 2041-2070 keskmiste sademete kasvule vaatamata vooluhulgad vähenevad tähendab see, et suurenema peab nende protsesside osakaal, mis viivad vee süsteemist välja. Sellest lähtuvalt on perioodi 2041-2070 Keila jõe keskmiste vooluhulkade vähenemise üheks põhjuseks see, et kuigi aasta keskmine sademete

hulk kasvab 5 % ei piisa sellest, et ületada keskmise temperatuuri tõusust tekkinud aurumise suurenemist taimedelt ja pinnaselt (Joonis 3.7). Kuigi perioodil 2071-2100 tõuseb samuti aasta keskmine temperatuur piisab kasvavast sademete hulgast, et ületada keskmise temperatuuri tõusust tingitud suurem aurumine taimedelt ja pinnaselt ja jõe keskmine vooluhulk suureneb.



Joonis 3.7. Keskliste temperatuuride ja sademete hulkade võrdlus perioodidel 1966-2010, 2041-2070 ja 2071-2100

Keskliste vooluhulkade muutus ei anna tervikpilti, millised muutused toimuvad kliima muutudes hüdrograafil. Et näha, mis toimub kliima muutudes hüdrograafil võrreldi kaht modelleeritud aastat: 1986 ja 2076. Hüdrograafil (Joonis 3.8) on näha kliima muutuse mõju Keila jõe vooluhulkadele. Hüdrograafil on näha, et talvekuude keskliste temperatuuride tõusu tõttu nihkub kevadine tippvooluhulk aprilli algusest veebruarikuu algusesse. Hüdrograafil on näha ka, et kevadine tippvooluhulk on aastal 2076 väiksem, mis tuleneb sellest et keskliste temperatuuride tõusu tõttu sulab mingi osa lund enne kevadise tippvooluhulga tekkimist ära.



Joonis 3.8. Keila jõe modelleeritud vooluhulkade muutus aastatel 1986 ja 2076

Hüdrograafilt on näha ka sügiseste vooluhulkade suurenemine tulevikus. Suveperioodil on mõlemate aastate vooluhulgad sarnased. Sademete hulk suveperioodil tulevikus küll suureneb, kuid temperatuuri tõusu tõttu on ka aurumine suurem, mis tähendab et vooluhulgad jäävad sarnaseks. Kummalgi aastal pole suveperioodil vooluhulk jões piisav hüdroenergia tootmiseks.

Päevade arv, mil vooluhulk jões on piisav hüdroenergia tootmiseks on mõlematel aastatel sarnane. Aastal 1986 saab hüdroenergiat toota 221 päeval ja aastal 2076 on hüdroenergia tootmine võimalik 219 päeval.

3.4. Hüdroenergeetiline potentsiaal

3.4.1. Aastate keskmise tootlikkuse muutus tulevikus

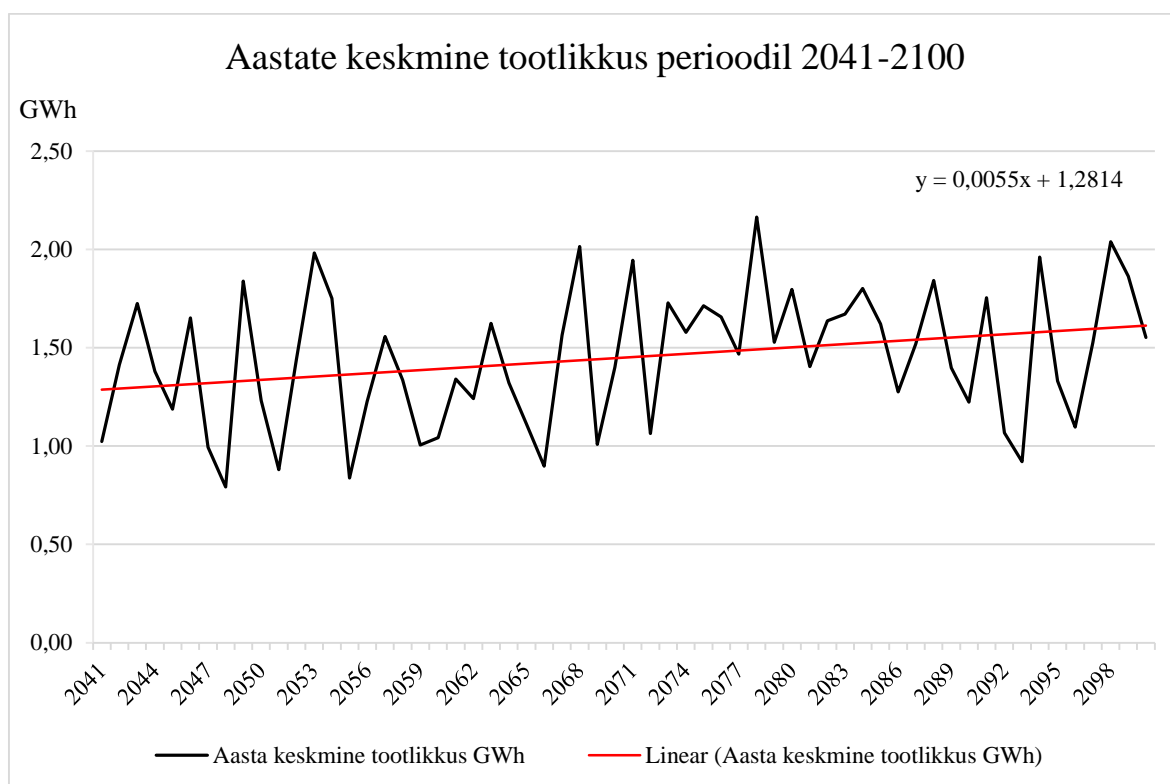
Hüdroenergeetiline potentsiaal arvutati perioodile 2041-2100. Energeetiline võimsus igale päevale arvutati vastavalt valemist (Valem 2.5), millega saadi HEJ päevane võimsus (kWh). Arvutamisel võeti arvesse kasuteguri sõltuvust vooluhulga täituvusest (Joonis 2.11) ja vee erikasutusloas sätestatud piirangud, mille kohaselt perioodil 1. maist kuni 1. septembrini

laupäevadel ja pühapäevadel ning riiklikel pühadel jõe vooluhulga korral alla 10 m³/s tuleb kell 12.00- 20.00 kogu vooluhulk suunata Keila joale. Aastase tootlikkuse arvutamiseks kasutati järgnevat valemit:

$$W = P \cdot 24 \cdot 365, \quad (3.4)$$

kus P – jaama võimsus (kW)

Arvutatud tulemused näitasid hüdroenergeetilise potentsiaali kasvu tulevikus (Joonis 3.9).

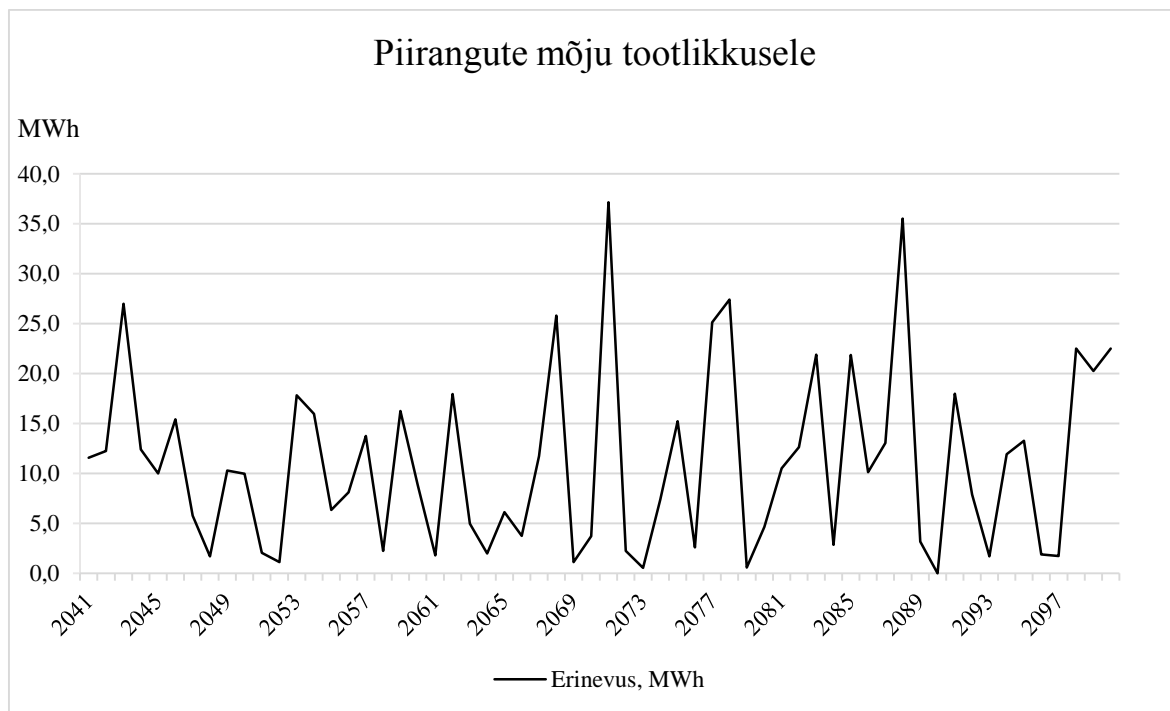


Joonis 3.9. Aastate keskmine hüdroenergia tootlikkus perioodil 2041-2100

Keskmine aastate hüdroenergeetiline potentsiaal Keila-Joa hüdroelektrijaamas perioodil 1966-2010 oli 1,37 GWh. Perioodil 2041-2070 on keskmine hüdroenergeetiline potentsiaal 1,33 GWh olles 0,04 GWh ehk ligi 3 % väiksem, kui perioodil 1966-2010. Hüdroenergeetilise potentsiaali vähenemine sel perioodil on tingitud vooluhulkade vähenemisest. Perioodil 2071-2100 on keskmine hüdroenergeetiline potentsiaal 1,57 GWh, mis tähendab ligi 15 protsendilist hüdroenergeetilise potentsiaali kasvu võrreldes perioodiga 1966-2010.

3.4.2. Vee erikasutusloas sätestatud piirangute mõju tootlikkusele

Vee erikasutusloas sätestatud hüdroenergia tootmise piirangute mõju on toodud joonisel 3.10.

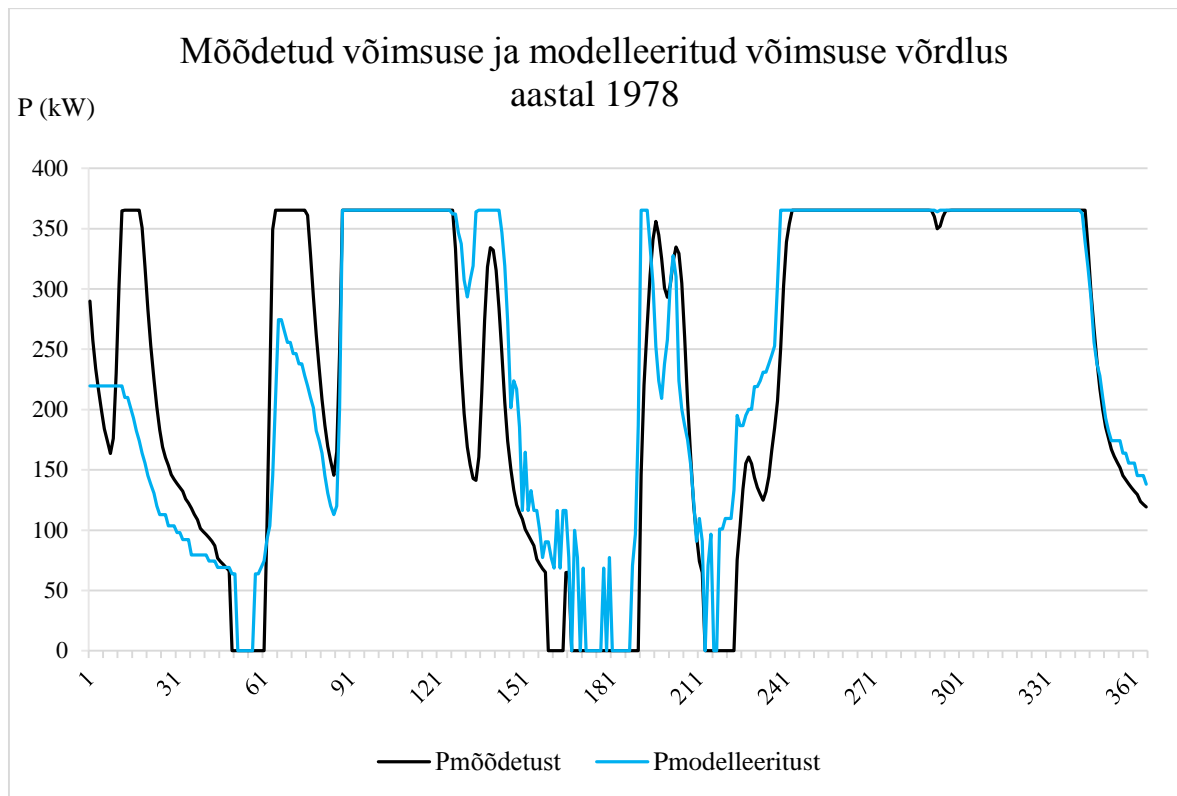


Joonis 3.10. Aastate keskmise hüdroenergia tootlikkuse erinevus koos vee erikasutusloas sätestatud piirangutega ja piiranguteta perioodil 2041-2100

Suurim erinevus hüdroenergia tootlikkuse vahel on aastal 2071, mil ilma piiranguteta oleks võimalik hüdroenergiat toota 1981 MWh, koos piirangutega on võimalik hüdroenergiat toota 1944 MWh, erinevuseks on seega ligi 2 %. Kogu perioodi keskmine aastane tootlikkus koos vee erikasutusloas sätestatud piirangutega on 1450 MWh. Keskmine tootlikkus ilma vee erikasutusloas sätestatud piiranguteta on 1461 MWh, mis tähendab et vahe on vaid ligi 1 %. Seega ei avalda vee erikasutusloas sätestatud piirangud aasta keskmisele tootlikkusele märkimisväärset mõju.

3.4.3. Modelleeritud vooluhulkadega tekkiva vea hindamine

Võimsuse arvutustes modelleeritud vooluhulkadega tekkiva vea suuruse hindamiseks võrreldi 1978. aastal mõõdetud ja modelleeritud vooluhulkade järgi päevase sammuga arvutatud võimsuseid (Joonis 3.11).

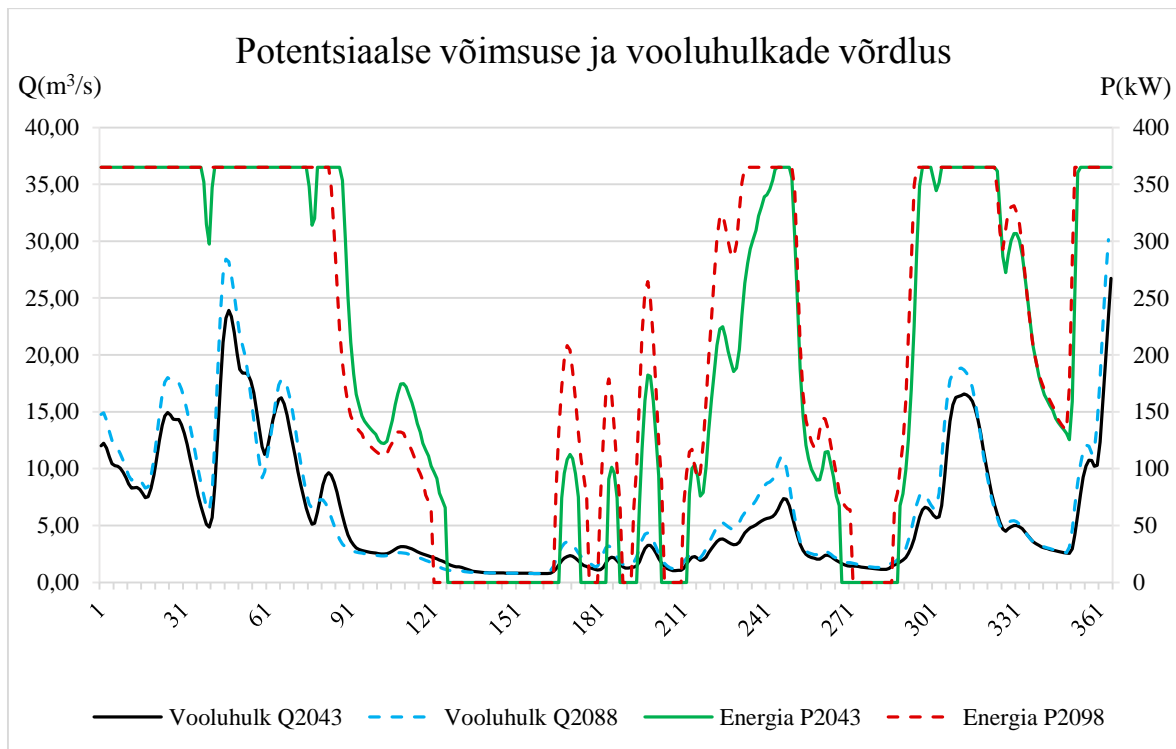


Joonis 3.11. Mõõdetud vooluhulkadega arvutatud võimsuse ja modelleeritud vooluhulkadega arvutatud hüdroelektrijaama võimsuse võrdlus aastal 1978

1978. aastal oli mõõdetud vooluhulkade järgi arvutatud tootlikkus kokku 2,088 GWh ja modelleeritud vooluhulkade järgi arvutatud tootlikkus 2,122 GWh. Seega tootlikkuse vaheks on 0,035 GWh, mis tähendab modelleeritud tulemuse umbes 2 protsendilist eksimust. Selle tulemuse põhjal võib väita, et modelleeritud vooluhulkade järgi arvutatud tootlikkus on realistlik.

3.4.4. Kliimamuutuse mõju hüdroelektrijaama tootlikkusele

Võrreldes aastate 2043 ja 2088 hüdroenergeetilise potentsiaali muutust on näha kliimamuutuse mõju hüdroelektrijaama tootlikkusele (Joonis 3.12).

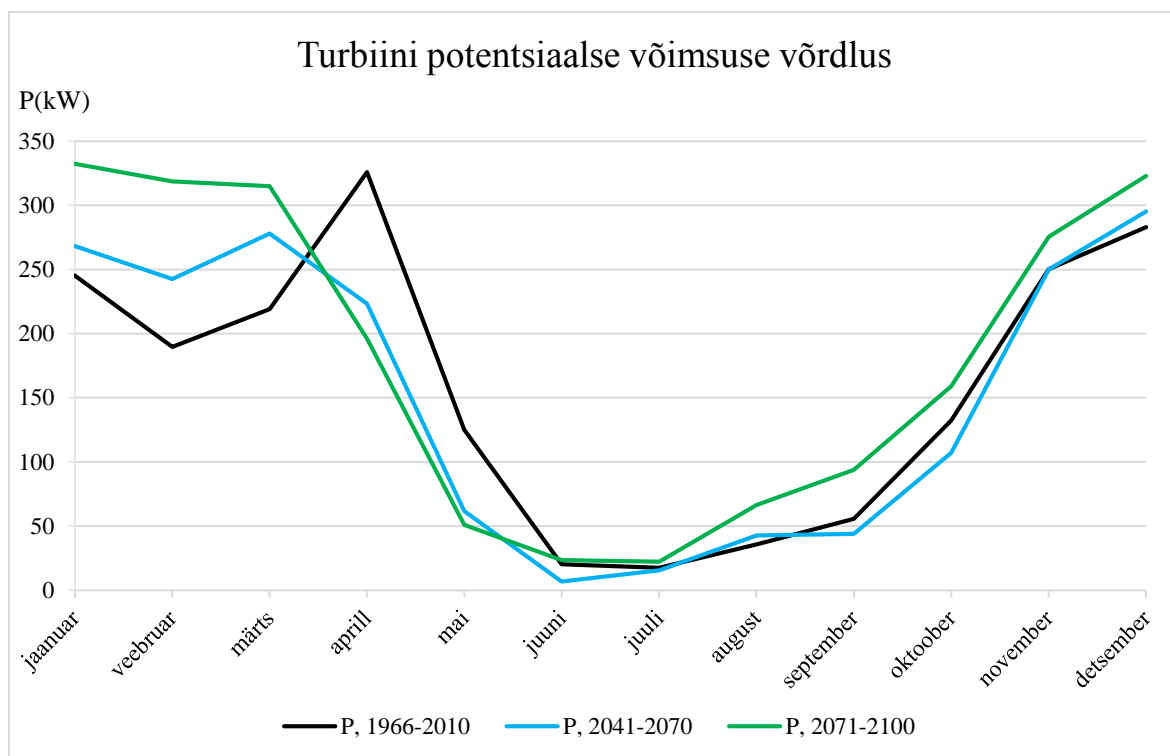


Joonis 3.12. Potentsiaalse võimsuse ja vooluhulkade võrdlus aastatel 2043 ja 2088

Esimeses kvartalis suuri erinevusi ei eksisteeri, prognoosi kohaselt vooluhulgad aastal 2088 küll suurenevad, kuid turbiin töötab enamuse ajast maksimaalse võimsusega juba 2043. aasta vooluhulkade juures, seega tootlikkus püsib samal tasemel. Tootlikkuse esimeses kvartalis 2043 aastal on 778 MWh ja 767 MWh aastal 2088, erinevus on seega ligikaudu 1 protsent. Tootlikkuseks teises kvartalis modelleeritud vooluhulkade järgi on 126 MWh aastal 2043 ja 122 MWh aastal 2088, erinevus jääb seega 3 protsendi piiresse. Kolmandas kvartalis on näha vooluhulkade suurenemist ja selle läbi ka tootlikkuse suurenemist aastal 2088. Kolmanda kvartali tootlikkuseks aastal 2043 ja 2088 on vastavalt 284 MWh ja 378 MWh, erinevus on seega rohkem, kui 20 protsenti. Ka neljandaks kvartaliks prognoosib mudel aastaks 2088 vooluhulkade ja seega ka hüdroelektrijaama tootlikkuse kasvu. Neljanda kvartali tootlikkuseks prognoosib mudel aastatel 2043 ja 2088 vastavalt 536 MWh ja 565 MWh, erinevus on seega pea 5 protsenti. Kokku prognoosib mudel 2043 aasta tootlikkuseks 1,725 GWh ja aasta 2088 tootlikkuseks 1,833 GWh, seega tootlikkuse tõus on ligi 6 %.

3.4.5. Turbiini potentsiaalse võimsuse muutus

Hindamaks turbiini potentsiaalse võimsuse muutust tulevikus võrreldi perioodide 1966-2010, 2041-2070 ja 2071-2100 kuu keskmisi võimsusi (Joonis 3.13).



Joonis 3.13. Turbiini potentsiaalse võimsuse võrdlus perioodidel 1966-2010, 2041-2100, 2071-2100

Turbiini potentsiaalse võimsuse võrdluse jooniselt on näha, nagu ka jooniselt 3.6, et lumesulaperiood nihkub tulevikus varasemaks. Võrreldes perioode 1966-2010 ja 2041-2070 on näha, et suurim erinevus turbiini potentsiaalses võimsuses esineb eelnimetatud perioodidel talve- ja kevadkuudel. Suurim erinevus esineb aprillikuus, mil perioodi 2041-2070 potentsiaalne võimsus on 102 kW väiksem, kui perioodil 1966-2010. Aprillikuine erinevus on tingitud sellest, et perioodil 1966-2010 esinevad kevadised tippvooluhulgad aprillikuus, kuid perioodil 2041-2070 märtsikuus. Suve- ja sügiskuudel on erinevus väike, suurim erinevus esineb oktoobrikuus (20 kW). Võrreldes omavahel perioode 1966-2010 ja 2071-2100 on näha, et sarnaselt perioodiga 2041-2070 esineb suurim erinevus kevad- ja talvekuudel. Aprillikuus on perioodil 1966-2010 turbiini potentsiaalne võimsus 130 kW suurem ja veebruarikuus 129 kW väiksem, kui perioodil 2071-2100. Minimaalne on erinevus võimsustes on juuni ja juulikuus, mil erinevus on vastavalt 3 kW ja 5 kW ning seejärel

hakkab vahe potentsiaalses võimsuses taas kasvama olles augustis ja sügiskuudel suurem, kui 20 kW. Summaarne kuude keskmine potentsiaalne võimsus perioodidel 1966-2010, 2041-2070 ja 2071-2100 on vastavalt 1899 kW, 1835 kW ja 2177 kW. Seega võrreldes perioodiga 1966-2010 väheneb turbiini potentsiaalne võimsus 64 kW (3 %). Perioodil 2071-2100 kasvab turbiini potentsiaalne võimsus 278 kW (14,6 %). Potentsiaalse võimsuse kahanemine perioodil 2041-2070 tuleneb vooluhulkade ja selle läbi võimsuse vähenemisest kevad- suve- ja sügiskuudel. Võimsuse kasv perioodil 2071-2100 tuleneb suurenenud sademete hulgast ja selle läbi suurenenud jõe vooluhulgast suve- sügis- ja talvekuudel.

4. ARUTELU

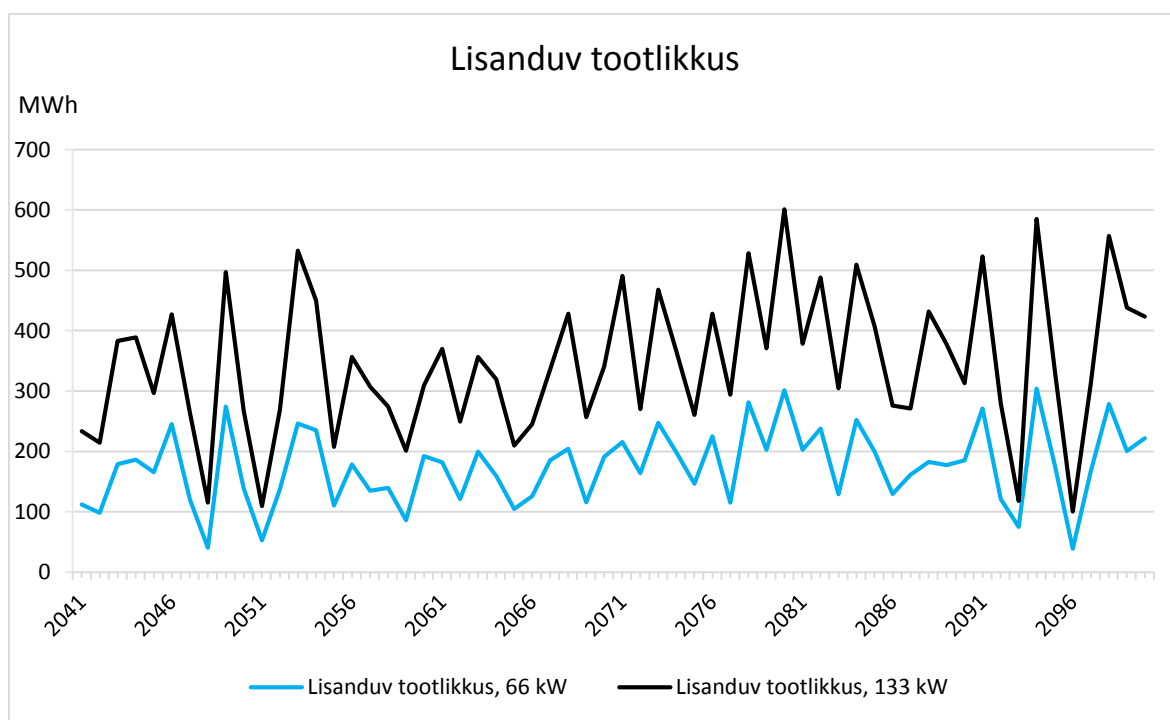
HYPE mudeliga vooluhulkade modelleerimisel saadi esialgse modelleerimise tulemusena perioodi 1968-2010 NSE 0,48, mis tähendas et mudel ei modelleeri vooluhulkasid piisavalt tõhusalt. Ebarahuldav NSE väärtus tuleneb erinevatest ebamäärasustest ja ebatäpsustest mudeli parameetrite väärtuste määramisel. Üheks ebamäärasuseks võib olla vooluhulkade mõõtmisviga, mis võib ulatuda kuni 20 protsendini (Baldassarre, Montanari 2009). Teiseks võimalikuks ebamäärasuseks on sademete mõõtmisviga, mis võib ulatuda kuni 15 protsendini (Wagner 2009). Ebamäärasusi vähendati parameetrite väärtuste kalibreerimisega.

Eesti Maaülikooli nooremteadur Ottar Tamm hindas enda magistritöös (Tamm 2013) SWAT mudeli kasutatavust Kunda jõe vooluhulkade modelleerimisel ja analüüsis, kuidas tuleviku (2011-2099) vooluhulkade muutus mõjutab Kunda tsemenditehase hüdroelektrijaama tootlikkust. SWAT on füüsiliste protsesside modelleerimisel põhinev hüdroloogiline mudel. Tulemusena osutus Kunda jõe vooluhulkade modelleerimisel hüdroloogiline mudel SWAT tõhusaks, valideerimisel saadi NSE väärtuseks 0,60, mis tähendab rahuldavat mudeli efektiivsust vooluhulkade modelleerimisel. Võrdluseks saadi käesolevas lõputöös valideerimisperioodi NSE väärtuseks 0,63. Hüdroenergeetilise potentsiaali kasvuks Kunda jõel saadi perioodi 2011-2099 lõpuks 0,25 GWh, mis tähendab 10 protsendilist kasvu, käesolevas lõputöö tulemuseks saadi, et perioodil 2041-2070 hüdroenergeetiline potentsiaal väheneb 0,04 GWh (3 %) ja perioodil 2071-2100 kasvab GWh (15 %).

Käesoleva lõputöö tulemus hüdroenergeetilise potentsiaali kasvu osas ühtib osaliselt Kasseli ülikooli poolt välja antud uurimistöö tulemusega, mille järgi kasvab hüdroenergeetiline potentsiaal perioodil 2020-2070 Mandri-Eestis 10-25 protsenti (Lehner, B et al. 2001). Eelnimetatud uurimistöös kasutati kahte kliimastsenaariumit perioodiks 2020-2070 ning arvutusteks kasutati programmi WaterGAP resolutsiooniga 30x50 km. Aastaks 2070 prognoosisid hüdroenergeetilise potentsiaali kasvu 10-25 % Mandri-Eestis mõlemad eelnimetatud uurimistöös kasutatud kliimastsenaariumid. Uurimistöö tulemusega ühtib perioodi 2071-2100 modelleeritud vooluhulkadega arvutatud hüdroenergeetilise potentsiaali

kasv 15 %. Perioodile 2041-2070 saadud tulemus uurimistöö tulemusega ei ühti Üheks põhjuseks võib olla kasutatud kliimastenaariumite erinevus.

Lõputöös kasutatud kliimastenaariumi järgi modelleeritud hüdroelektrijaama aasta keskmine hüdroenergia tootlikkus prognoosib perioodil 2071-2100 hüdroenergeetilise potentsiaali kasvu 0,20 GWh (15 %). Seega võiks kaaluda Keila-Joa hüdroelektrijaama täiendava turbiini lisamist, mis tulevikus aitaks ära kasutada kasvavat hüdroenergeetilist potentsiaali ja kuni selle ajani aidata kaasa kevadise ja talvise hüdroenergeetilise potentsiaali tõhusamale kasutamisele. Joonisel 4.1 on näha lisanduva tootlikkuse võrdlus, kui Keila-Joa hüdroelektrijaama lisada 1 m³/s nimivooluhulgaga ja võimsusega 66 kW turbiin või 2 m³/s nimivooluhulgaga ja võimsusega 133 kW turbiin. Lisanduv tootlikkus perioodil 2041-2100 on toodud joonisel 4.1.



Joonis 4.1. Tootlikkuse kasvu võrdlus hüdroelektrijaama 1 m³/s ja 2 m³/s nimivooluhulgaga turbiini lisamisel perioodil 2041-2100

Täiendava 66 kW turbiini lisamisel Keila-Joa hüdroelektrijaama suureneb aasta keskmine tootlikkus keskmiselt 174 MWh ning lisades turbiini võimsusega 133 kW suureneb aasta keskmine tootlikkus 345 MWh.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli hinnata hüdroloogilise mudeli HYPE kasutatavust Eestis, Keila jõe näitel ja mudeli sobivusel tuleviku vooluhulkade modelleerimine. Põhiliseks eesmärgiks oli modelleeritud vooluhulkade kaudu Keila jõe hüdroenergeetilise potentsiaali arvutamine perioodile 2041-2100. Eesmärgiks oli ka analüüsida, kuidas tuleviku vooluhulkade muutus mõjutab Keila-Joa hüdroelektrijaama sesoonset tootlikkust.

Esialgne HYPE mudeli lahendus ei olnud piisavalt tõhus, esimese lahenduse NSE väärtus oli 0,48, mis tähendas ebarahuldavat efektiivsust. Selle tõttu tuli parema tulemuse saavutamiseks kalibreerida mudeli parameetrid. Kalibreerimismeetodiks valiti diferentsiaalevolutsiooniline Markovi ahela meetod. Kalibreerimiseks valiti 28 tähtsamat mudeli parameetrit. Parameetrite väärtuste vahemik, mille piires kalibreerida määrati eraldi igale mulla- ja maakasutustüübile. Eraldi määrati parameetrite väärtuste vahemik ka üldistele parameetritele.

Kalibreerimine teostati perioodile 1968-1997. Kalibreerimise tulemusena saadud parima lahenduse NSE ja KGE väärtusteks olid vastavalt 0,66 ja 0,76, mis tähendab mõlema otsustusfunktsiooni järgi mudeli head efektiivsust vooluhulkade modelleerimisel. Eraldi hinnati mudeli efektiivsust ka vooluhulkade vahemikus, kus turbiin töötab, selle vooluhulkade vahemiku NSE ja KGE väärtused saadi vastavalt 0,59 ja 0,68. Kuna mudel oli hindamiskriteeriumi põhjal piisavalt efektiivne ($NSE > 0,50$, $KGE > 0,50$), kasutati kalibreerimisel saadud mudeli parameetrite väärtuseid valideerimisel. Kuna mudeli tulemusi tuli kontrollida selle perioodi vaatlusandmetega, mida ei kasutatud kalibreerimisel teostati valideerimine perioodile 1998-2010. Seega valideerimisel kontrolliti mudeli efektiivsust olukorras, kus muutub ainult ilmastik. Sellest saab järeldada, et kui mudel töötab piisavalt efektiivselt valideerimisele töötab mudel tõhusalt ka tuleviku vooluhulkade modelleerimisel kuna tuleviku vooluhulkade modelleerimisel muutub ainult ilmastik. Valideerimisperioodi NSE ja KGE väärtuseks saadi vastavalt 0,63 ja 0,66, mis tähendab mõlema otsustusfunktsiooni järgi rahuldavat mudeli efektiivsust. Seega võib eeldada, et mudel modelleerib ka tuleviku vooluhulkasid efektiivselt. Sarnaselt kalibreerimisele hinnati ka

valideerimisperioodil mudeli tõhusust vooluhulkade modelleerimisel vahemikus, kus turbiin töötab. NSE ja KGE väärtused saadi vastavalt 0,56 ja 0,61. Seega oli täidetud nõue $NSE > 0,50$, $KGE > 0,50$ ja kalibreerimisel saadud parameetrite väärtusi kasutati tuleviku vooluhulkade modelleerimisel.

Tuleviku vooluhulkade modelleerimiseks tuli muuta sademete ja temperatuuride andmeid vastavalt kliimastsenaariumile. Kliimastsenaariumiks valiti globaalne stsenaarium RCP4.5, mis on soovitatav mõõdukas põhistsenaarium ja eeldab riikide poolt olulisi kliima soojenemist leevendavaid meetmeid. Valitud kliimastsenaarium eeldab, et emissioonide tipp jääb 21. sajandi sisse ja kiirguslikud mõjud sajandi lõpuks on $4,5 \text{ W/m}^2$. RCP eeldab, et kõik maailma riigid võtavad ette kasvuhoonegaaside emissioonide piiramise nende maksustamise näol. Kliimastsenaariumid on koostatud perioodidele 2041-2070 ja 2071-2100. Antud kliimamudel prognoosib keskmise õhutemperatuuri tõusu Keila jõe valgatal 2100. aastaks $2,9^\circ\text{C}$. Kliimastsenaarium prognoosib ka aasta keskmise sademete hulga suurenemist 2100. aastaks 140 mm. Temperatuuri tõus ja sademete suurenemine toob endaga kaasa talveperioodi vooluhulkade suurenemise. Kasutatud kliimastsenaariumi järgi on kevadised tippvooluhulgad tulevikus väiksemad ja saabuvad kuu kuni kaks varem.

Kliimastsenaariumit arvesse võttes modelleeriti tuleviku vooluhulgad, millede järgi keskmised vooluhulgad vähenevad perioodil 2041-2070 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ja kasvavad perioodil 2071-2100 $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ võrreldes perioodiga 1966-2010, mil keskmine vooluhulk oli $6,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Hüdroenergeetiline potentsiaal perioodil 1966-2010 oli 1,37 GWh. Tulenevalt vähenenud vooluhulgast vähenes perioodil 2041-2070 ka hüdroenergeetiline potentsiaal olles 1,33 GWh ja 0,04 GWh väiksem, kui perioodil 1966-2010, mis tähendab 3 protsendilist vähenemist. Perioodil 2071-2100 oli hüdroenergeetiline potentsiaal 1,57 GWh, seega kasvas hüdroenergeetiline potentsiaal 0,20 GWh ehk 15 protsenti.

Vee erikasutusloas sätestatud hüdroenergia tootmise piirangute mõju hindamiseks võrreldi hüdroenergia tootlikkuse erinevust koos vee erikasutusloas sätestatud piirangutega ja piiranguteta perioodil 2041-2100. Leiti, et keskmine tootlikkus ilma piiranguteta on 1461 MWh ja koos piirangutega 1450 MWh, mis tähendab 1 protsendilist erinevust. Seega ei avalda vee erikasutusloas sätestatud piirangud aasta keskmisele tootlikkusele märkimisväärset mõju.

Vooluhulkade muutus tulevikus tähendab seda, et muutub ka turbiini võimekus. Perioodil 1966-2010 oli turbiini aasta keskmine potentsiaalne võimsus 1899 kW. Võrreldes perioodiga 1966-2010 väheneb perioodil 2041-2070 turbiini potentsiaalne võimsus 64 kW (3 %). Perioodil 2071-2100 kasvab turbiini potentsiaalne võimsus 278 kW (14,6 %).

Võimsuse arvutustes modelleeritud vooluhulkadega tekkiva vea suuruse hindamiseks võrreldi 1978. aastal mõõdetud ja modelleeritud vooluhulkade järgi päevase sammuga arvutatud võimsuseid. Leiti, et tootlikkuse vaheks on 0,035 GWh, mis tähendab modelleeritud tulemust umbes 2 protsendilist eksimust. Selle tulemuse põhjal võib väita, et modelleeritud vooluhulkade järgi arvutatud tootlikkus on realistlik.

Hüdroenergeetilise potentsiaali kasvust tulenevalt võiks lisada Keila-Joa hüdroelektrijaama täiendava turbiini võimsusega 66 kW ja nimivooluhulgaga 1 m³/s või 133 kW ja nimivooluhulgaga 2 m³/s. Võimsusega 66 kW ja 133 kW turbiini lisamisel suureneb aasta keskmine hüdroenergeetiline potentsiaal vastavalt 174 ja 345 MWh.

KASUTATUD KIRJANDUS

- About Hype (2017). *SMHI Hype Code*. <http://hypecode.smhi.se/about-hype/> (09.03.2017)
- Baldassarre, G., Montanari A.** (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*. Nr 6 (1), lk 914-920.
- Braak, C. J. F.** (2006). A Markov-Chain Monte Carlo version of the genetic algorithm Differential Evolution: easy Bayesian computing for real parameter spaces. *Statistics and Computing*. Nr 16 (3), lk 239-249.
- Devi G. K., Ganasri B. P., Dwarakish G.S.** (2015). A Review on Hydrological Models. *Aqautic Procedia*. Nr 4, lk 1001-1007
- Eesti tuleviku kliimastenaariumid. (2014). Lepingulise töö aruanne. Keskkonnaagentuur. 89 lk.
- Gupta H. V., Kling H., Yilmaz K. K., Martinez G. F.** (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. Nr 377, lk 80-91
- Gupta H. V., Sorooshian S., Yapo O. P.** (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison With Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*. Nr 4 (2), lk 135-143
- Haltiner, G. J., Martin, F.L.** (1957). Dynamical and physical meteorology. New York: McGraw-Hill Book Company. 470 lk.
- Järvekülg, A.** (2001). Eesti jõed. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus. 750 lk.
- Keila hüdromeetriaajaam. (2017). *Riigi Ilmateenistus*.
<http://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/vaatlusvork/keila-hudromeetriaajaam/>
(24.04.2017)
- Keila jõe andmed. (2016). *Keskkonnaagentuur*.
http://loodus.keskkonnainfo.ee/eelis/default.aspx?state=5;68547593;est;eelisand;;&comp=objresult=veekogu&obj_id=620978939 (12.04.2017)
- Keila jõgi. (2017). *Keskkonnainfo*.
<http://register.keskkonnainfo.ee/envreg/main#HTTTPb0piVXmxgmd0KonqDiFqxqRnvcwu7BF> (12.04.2017)

- Keskmine õhutemperatuur (°C) 1981-2010. (2017). *Riigi Ilmateenistus*.
<http://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/ohutemperatuur/> (27.04.2017)
- Kling H., Fuchs M., Paulin M.** (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*. Nr 424-425. lk 264-277
- Lehner, B., Henrichs, T., Döll, P., Alcamo, J.** (2001): EuroWasser – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. Kassel World Water Series 5, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Kurt-Wolters-Strasse 3, 34109 Kassel, Germany.
- Liiber, Ü.** (2012). Energiamaajandus. Taastuvad energiaallikad.
<https://koolielu.ee/waramu/download?rid=1-424240e6-1a5c-4474-8cf9-546b760e8ca3&attachmentId=4901> (09.03.2017)
- Loolaid, I.** (2013). Ülevaade metaheuristilistest meetoditest ja rändkaupmehe ülesande lahendamise GRASP meetodiga. (Bakalaureusetöö). Tartu Ülikooli Matemaatika instituut, Tartu.
- Loopman, A.** (1979). Eesti NSV jõgede nimestik. Tallinn: Valgus. 167 lk.
- Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner L. R., Harmel R.D., Veith T.L.** (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Nr 50 (3). lk 885-900
- Mullastiku kaart. (2017). *Maa-ameti Geoportaal*.
<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Mullastiku-kaart-p33.html> (24.04.2017)
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V.** (1970). River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology*. Nr 10(3). lk 282-290
- Paisude ülevaatuslehed maakondade kaupa. (2016). *Keskkonnaagentuur*.
<http://keskkonnaagentuur.ee/et/eesmargid-tegevused/projektid/tokestusrajatiste-inventariseerimine-vooluveekogudel-kalade-3> (12.04.2017)
- Pechlivanidis I.G., Olsson J., Sharma D., Bosshard T., Sharma K.C.** (2015). Assessment of the climate change impacts on the water resources of the Luni region, India. *Global NEST Journal*. Nr 17(1). lk 29-40.
- Päikesepaiste kestus (tundi) 1981-2010. (2017). *Riigi Ilmateenistus*.
<http://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/paikesepaiste-kestus/> (28.04.2017)

- Raesaar, P.** (2005). Eesti veejõu kasutamisest. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine : kuuenda konverentsi kogumik. Tartu : Halo. lk. 10-17
- Serfozo, R.** (2009). Basics of Applied Stochastic Processes. Berliin: Springer-Verlag. 437 lk.
- Sevat, E., Dexetter, A.** (1991). Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area. *Hydrological Sciences – Journal*. Nr 36(4). lk 307-330.
- Smith, T. J., Marshall, L.A.** (2008), Bayesian methods in hydrologic modeling: A study of recent advancements in Markov chain Monte Carlo techniques. *Water Resources Research*. Nr 44. lk 1-9.
- Taastuvenergia aastaraamat 2015. (2016). *Eesti Taastuvenergia Koda*.
http://www.taastuvenergeetika.ee/wp-content/uploads/2016/12/TEK_aastaraamat_A4_juuni16_40lk_PREVIEW-1.pdf
 (09.03.2017)
- Tamm, O.** (2013). Kunda jõe hüdroenergeetilise potentsiaali modelleerimine. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
- Tamm, T.** (2002). Effects of meteorological conditions and water management on hydrological processes in agricultural field. Parametrization and modelling of Estonian case studies. Espoo: Otamedia Oy. 194 lk.
- Thiemig V., Rojas R., Zambrano-Bigiarini M., De Roo A.** (2013). Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. *Journal of Hydrology*. Nr 499. lk 324-338
- Velbri, K.** (2008). Globaalne soojenemine ja kliimamuutused. (Urimus). 77 lk.
- Wagner, A.** (2009). Literature Study on the Correction of Precipitation Measurements. <https://pdfs.semanticscholar.org/0d2c/f26530255986e62cdb4297a1c4698be65677.pdf>
 (11.05.2017).
- World Energy Resources – Hydropower 2016. (2017). *World Energy Council*.
https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Hydropower_2016.pdf (09.03.2017)
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики, т. 4. Прибалтийский район, вып. I: Эстония. 1966. Ленинград. 200 с.

MODELLING OF THE HYDROENERGETICAL POTENTIAL OF RIVER KEILA USING THE HYPE MODEL

SUMMARY

The aim of this thesis was to evaluate the applicability of hydrological model HYPE in Keila river flow modelling and modelling of future Keila river flows. Main goal was to calculate Keila river hydroenergetical potential in Keila-Joa hydropower plant for the time period of 2041-2100 and to evaluate how changes in Keila river flows affect the productivity of aforementioned hydropower plant.

The efficiency of the model was evaluated with Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) and Kling-Gupta model efficiency coefficient (KGE). The values of both efficiency coefficients had to be larger than 0,50 for the model to be acceptable. Initial HYPE model solution's KGE value was larger than 0,50, NSE value was 0,47 which meant the model efficiency wasn't acceptable so the model parameter values had to be calibrated. For calibration the differential evolution Markov chain method was chosen. The range of parameter values for calibration had to be set separately for general parameters and for soil type and land use dependent parameters. The default parameter values are zero.

Time period 1968-1997 was used for calibration and validated against period 1998-2010. As a result of calibration the model NSE and KGE values were 0,66 and 0,76 accordingly. Which meant the model had good efficiency in Keila river flow modelling. Validation period NSE and KGE values were 0,63 and 0,66 accordingly, which meant acceptable model efficiency. Validation shows how efficient the model is when weather conditions are the only variables. So this means that the model is trustworthy for modelling of future river flows and the parameter values gotten from calibration were used for future flow modelling.

To predict the future flows of river Keila the data of rainfall and temperature had to be changed according to climate change scenario. For climate change scenario a global scenario

RCP4.5 (Representative Concentration Pathway) was chosen. RCP4.5 is a recommended moderate main scenario and it expects all countries to take part in mitigating the effects of climate change. Chosen climate change scenario expects that the peak of greenhouse gas emissions will stay in 21st century and radiative forcing will be $4,5 \text{ W/m}^2$ by the end of the century. Climate scenarios for Estonia are composed for two time periods: 2041-2070 and 2071-2100. Given climate change scenario predicts that by year 2100 average temperature will rise by $2,9^\circ\text{C}$ and the average rainfall per year will rise 140 mm. This means that in future the flows will be bigger in winter period and spring peak flows will be smaller and arrive a month or two earlier.

The future flows were then modelled by taking account the climate change scenario. On time period 1966-2010 average discharge was $6,3 \text{ m}^3/\text{s}$. On time period 2041-2070 river discharge decreased by $1 \text{ m}^3/\text{s}$ and on time period 2071-2100 river discharge increased by $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Hydroenergetical potential on time period 1966-2010 was 1,37 GWh. Hydroenergetical potential decreased by 0,04 GWh and increased by 0,20 GWh on time period 2071-2100.

Due to rise in hydroenergetical potential installing a second turbine should be considered. A turbine with 66 kW capacity and $1 \text{ m}^3/\text{s}$ flow rate would increase yearly energy production by 174 MWh. A turbine with 133 kW capacity and $2 \text{ m}^3/\text{s}$ flow rate would increase yearly energy production by 345 MWh.

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Sander Soomets,
(sünnipäev)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
Keila jõe hüdroenergeetilise potentsiaali modelleerimine kasutades HYPE mudelit
mille juhendaja on Ottar Tamm,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 22.05.2017

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)